Aus dem Programm Kraftfahrzeugtechnik

Handbuch Verbrennungsmotor
herausgegeben von R. van Basshuysen und F. Schäfer

Lexikon Motorentechnik
herausgegeben von R. van Basshuysen und F. Schäfer

Ottomotor mit Direkteinspritzung
herausgegeben von R. van Basshuysen

Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik
herausgegeben von H.-H. Braess und U. Seiffert

Bremsenhandbuch
herausgegeben von B. Breuer und K. H. Bill

Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik
von H. Eichlseder und M. Klell

Umweltschutz in der Automobilindustrie
von D. Gruden

Fahrwerkhandbuch
herausgegeben von B. Heißing und M. Ersoy

Aerodynamik des Automobils
herausgegeben von W.-H. Hucho

Verbrennungsmotoren
von E. Köhler und R. Flierl

Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen
von F. Kramer

Fahrzeugreifen und Fahrwerkentwicklung
von G. Leister

Automobilelektronik
herausgegeben von K. Reif

Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz
herausgegeben von U. Seiffert und G. Rainer

Rennwagentechnik
von M. Trzesniowski

Handbuch Kraftfahrzeugelektronik
herausgegeben von H. Wallentowitz und K. Reif

Bussysteme in der Fahrzeugtechnik
von W. Zimmermann und R. Schmidgall

www.viewegteubner.de

Hermann Winner | Stephan Hakuli | Gabriele Wolf (Hrsg.)

Handbuch Fahrerassistenz-systeme

Grundlagen, Komponenten und Systeme
für aktive Sicherheit und Komfort

Mit 550 Abbildungen und 45 Tabellen

PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch

VIEWEG+
TEUBNER

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk entstand mit freundlicher Unterstützung der Continental AG, Division Chassis & Safety.

1. Auflage 2009

Alle Rechte vorbehalten
© Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009

Lektorat: Ewald Schmitt | Gabriele McLemore

Vieweg+Teubner ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.viewegteubner.de

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg
Satz: Klementz publishing services, Gundelfingen
Druck und buchbinderische Verarbeitung: STRAUSS GMBH, Mörlenbach
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.
Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0287-3

Vorwort

Fahrerassistenzsysteme haben sich in den letzten Jahren rasant entwickelt und sind fester Bestandteil in vielen heutigen Fahrzeugmodellen aller Fahrzeugklassen. Forschung und Entwicklung in Unternehmen und Universitäten beschäftigen sich mit der Optimierung der bestehenden Systeme und mit Weiterentwicklungen, die dem Fahrer ein noch höheres Maß an Assistenz und Unterstützung bieten sollen. Zeugnis dieser Arbeiten legen die vielen wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Tagungsbeiträge ab, doch eine umfassende Darstellung des heutigen Stands der Technik sowie der Grundlagen für die Entwicklung solcher Systeme suchte man bisher im deutschsprachigen Raum vergeblich. Zwar existieren einige Fachbücher, die sich mit Fahrerassistenzsystemen beschäftigen, doch sind diese stark auf einzelne Aspekte wie z. B. die Regelung solcher Systeme fokussiert. Aufbauend auf den Inhalten der Vorlesung Fahrerassistenzsysteme, die ich seit 2002 am Fachgebiet Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt (FZD) halte (seit dem Sommersemester 2008 mit erweitertem Umfang unter dem Titel Mechatronik und Assistenzsysteme im Automobil), wurde die Gliederung des vorliegenden Handbuchs Fahrerassistenzsysteme entwickelt.

Der Umfang der Thematik machte es erforderlich, die inhaltliche Arbeit auf viele Schultern zu verteilen, und so halten Sie nun ein Werk in Händen, dessen 44 Kapitel von insgesamt 95 Experten aus Industrie und Wissenschaft geschrieben wurden. Diese Autoren sind es, denen ich in erster Linie zu Dank verpflichtet bin, denn ohne ihre Bereitschaft, Zeit und Mühen in die Erstellung der Manuskripte zu investieren, hätte dieses Buch nicht entstehen können.

An einem solchen Projekt sind jedoch noch mehr Menschen beteiligt, und ich möchte es nicht versäumen, allen in diesem Vorwort für ihren Beitrag zu danken.

Ganz besonders zu Dank verpflichtet bin ich meinen beiden Mit-Herausgebern Herrn Stephan Hakuli und Frau Gabriele Wolf, in deren Händen die Organisation und alle operativen Aufgaben dieses Projekts von der Autorenbetreuung über die Zusammenarbeit mit dem Verlag bis zur Erstellung des Gesamtmanuskripts lagen. Für ihr ausgezeichnetes Projektmanagement und ihre Bereitschaft, diese zusätzlichen Aufgaben neben ihrer Arbeit als wissenschaftliche Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik auf sich zu nehmen, danke ich ihnen sehr herzlich. Frau Wolf danke ich darüber hinaus, dass sie den Anstoß dazu gab, dieses von mir in Gedanken schon länger gehegte Projekt in die Tat umzusetzen.

Dem Verlag Vieweg+Teubner danke ich für die Bereitschaft, dieses Handbuch herauszugeben. Für die angenehme Zusammenarbeit und kompetente Betreuung sei Herrn Ewald Schmitt, Frau Elisabeth Lange und Frau Gabriele McLemore gedankt.

Das Lektorat für dieses Buch wurde von Susanne und Katharina Mitteldorf durchgeführt. Ihre sorgfältige und aufmerksame Prüfung hat die hohe sprachliche Qualität der Texte ermöglicht, und dafür sowie die angenehme Zusammenarbeit bedanke ich mich sehr herzlich bei ihnen.

Herrn Danijel Pusic danke ich für seine Mitarbeiter bei der Konzeption des Buches und der Erarbeitung der Gliederung. Unterstützt wurden die Arbeiten an diesem Handbuch in vielfältiger Weise durch die studentischen Hilfskräfte Herrn Johannes Götzelmann, Herrn Richard Hurst, Frau Hyuliya Rashidova und Herrn Philip Weick. Auch ihnen sei gedankt.

Ich bedanke mich außerdem bei allen FZD-Mitarbeitern, die durch Korrekturlesen, fachliche Diskussionen oder sonstige hilfreiche Beiträge an der Entstehung dieses Buchs mitgewirkt haben.

Darmstadt, im Mai 2009 Prof. Dr. rer. nat. *Hermann Winner*

Die Herausgeber

Prof. Dr. rer. nat. **Hermann Winner** studierte Physik an der Westfälischen-Wilhelms-Universität (WWU) in Münster/Westfalen. Anschließend arbeitete er als wissenschaftlicher Assistent am Institut für Angewandte Physik der WWU Münster, wo er 1987 für seine Arbeit über die „Dynamik der Domänenwände in metallischen Ferromagnetika“ promoviert wurde.

Von 1987 bis 1994 arbeitete Hermann Winner bei der Robert Bosch GmbH in Karlsruhe, Ettlingen und Schwieberdingen in der Vorentwicklung von Mess- und Informationstechnik und war dabei u. a. verantwortlich für die Projekte PROMETHEUS-Drive-by-Wire, die Elektrohydraulische Bremse und Adaptive Cruise Control. In seiner Funktion als Leiter der Serienentwicklung von Adaptive Cruise Control lag sein Schwerpunkt auf Systementwicklung und Applikation und er führte das System schließlich zur Serie. In den Jahren 1993 bis 2001 war Hermann Winner außerdem Experte bei der ISO/TC204/WG14 – Vehicle/Roadway Warning and Control Systems – davon fünf Jahre als Leiter der deutschen Spiegelgruppe AK I.14 des FAKRA.

Seit 2002 ist Hermann Winner Inhaber des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität Darmstadt und Leiter des gleichnamigen Fachgebiets (FZD). Er baute dort die Forschung auf dem Gebiet der Fahrerassistenzsysteme aus, das heute eine der Kernkompetenzen von FZD darstellt. Dies zeigt sich anhand zahlreicher, erfolgreich durchgeführter Forschungsprojekte mit der Automobil- und Zulieferindustrie zu den Themen Umfeldsensorik, Funktionsbewertungen von Notbrems-, Notausweich- und Einbiege-/Kreuzen-Assistenz sowie Systemarchitektur von Fahrerassistenzsystemen.

Stephan Hakuli studierte Physik an der TU Darmstadt und schloss 2005 als Diplomingenieur der Physik ab. In seiner Diplomarbeit konzipierte und realisierte er ein Verfahren zur gescannten Belichtung und Vermessung holographischer Head-up-Displays. Seit Dezember 2005 arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik und koordinierte zwei Jahre lang die Lehraktivitäten des Fachgebiets. Im Rahmen seiner Forschungstätigkeit beschäftigt er sich mit Conduct-by-Wire, einem integrierten Fahrerassistenzkonzept für manöverbasierte Fahrzeugführung. [Foto: Fischer, Weinheim]

Gabriele Wolf studierte Wirtschaftsingenieurwesen Fachrichtung Maschinenbau an der TU Darmstadt und der TU Eindhoven. Sie ist seit Januar 2004 als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Fahrzeugtechnik, wo sie sich zunächst im Rahmen eines interdisziplinären Projekts mit Innovationspotenzialen im Fahrwerk beschäftigte. Im Bereich der Fahrerassistenzsysteme befasst sie sich mit der Bewertung von Systemen zur Unfallvermeidung, wobei sowohl technische als auch wirtschaftliche und gesellschaftliche Aspekte berücksichtigt werden.
[Foto: Fischer, Weinheim]

Autorenverzeichnis

Abendroth, Bettina, Dr.-Ing.	Technische Universität Darmstadt
Auer, Richard, Dr. rer. nat.	Volkswagen AG
Bachmann, Alexander, MSc	Universität Karlsruhe (TH)
Bachmann, Jürgen, Dipl.-Ing. (FH)	BMW Motorrad
Bartels, Arne, Dr.-Ing.	Volkswagen AG
Bayer, Bernward, Dr.-Ing.	Continental AG
Bender, Eva, Dr.-Ing.	Continental AG
Bielefeld, Jürgen, Dr.	BMW Group
Bock, Thomas, Dr.-Ing.	Audi AG
Brenner, Peter, Dipl.-Ing. (FH)	ZF Lenksysteme GmbH
Breuer, Jörg, Dr.-Ing.	Daimler AG
Brosig, Stefan, Dr.-Ing.	Volkswagen AG
Bruder, Ralph, Prof. Dr.-Ing.	Technische Universität Darmstadt
Büring, Hendrik, Dipl.-Ing. (TH)	ZF Lenksysteme GmbH
Büse, Axel, Dipl.-Ing.	Continental AG
Buxbaum, Bernd, Dr.	PMD Technologies GmbH
Danner, Bernd, Dipl.-Ing.	Daimler AG
Darms, Michael, Dr.-Ing.	Continental AG
Didier, Muriel, Dr.	Technische Universität Darmstadt
Donges, Edmund, Dr.-Ing.	vormals BMW AG
Dörner, Karlheinz, Dipl.-Ing.	MAN Nutzfahrzeuge AG
Duchow, Christian, Dipl.-Ing.	Universität Karlsruhe (TH)
Eckert, Alfred, Dipl.-Ing.	Continental AG
Fechner, Thomas, Dipl.-Ing.	Continental AG
Flemisch, Frank, Dr.-Ing.	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Gasser, Tom Michael, Ass. jur.	Bundesanstalt für Straßenwesen
Gayko, Jens E., Dr.-Ing.	Honda R&D Europe (Deutschland) GmbH
Geduld, Georg	vormals Omron Electronics GmbH
Gelau, Christhard, Dr.	Bundesanstalt für Straßenwesen
Gruber, Steffen, Dipl.-Ing.	Continental AG
Hakuli, Stephan, Dipl.-Ing.	Technische Universität Darmstadt
Hecker, Falk, Dr.	Knorr-Bremse
Hellmann, Wladimir, Dipl.-Ing.	Continental AG
Hipp, Eberhard, Dipl.-Ing.	MAN Nutzfahrzeuge AG
Hoffmann, Jens, Dr.-Ing.	Continental AG

Hopstock, Matthias, Dipl.-Ing.	BMW Group
Huhn, Wolfgang, Dr.	Audi AG
Isermann, Rolf, Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c.	Technische Universität Darmstadt
Kammel, Sören, Dr.-Ing.	vormals Universität Karlsruhe (TH)
Katzwinkel, Reiner, Dipl.-Ing.	Volkswagen AG
Kersken, Ulrich, Dipl.-Ing.	Robert Bosch Car Multimedia GmbH
Khanh, Tran Quoc, Prof. Dr.-Ing.	Technische Universität Darmstadt
Klanner, Felix, Dr.-Ing.	BMW Group
Kleine-Besten, Thomas, Dr.-Ing.	Robert Bosch Car Multimedia GmbH
Knoll, Peter, Prof. Dr.-Ing.	Universität Karlsruhe (TH) IF+F Ingenieurbüro für Fahrerassistenz und Fahrerinformation
Köhn, Philip, Dr.-Ing.	BMW Group
König, Winfried, Dr.-Ing.	Robert Bosch GmbH
Kost, Friedrich, Dipl.-Ing.	Robert Bosch GmbH
Landau, Kurt, Prof. Dr.-Ing.	vormals Technische Universität Darmstadt
Lange, Robert, Dr.-Ing.	PMD Technologies GmbH
Löper, Christian, Dipl.-Ing.	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Mages, Mark, Dr.-Ing.	TRW Automotive
Maurer, Markus, Prof. Dr.-Ing.	Technische Universität Braunschweig
Mörbe, Matthias, Dipl.-Ing.	Robert Bosch GmbH
Noll, Martin, Dr.	Robert Bosch GmbH
Ocvirk, Norbert, Dipl.-Ing.	Continental AG
Piller, Bernd, Dipl.-Ing.	Continental AG
Pöchmüller, Werner, Dr.-Ing.	Robert Bosch Car Multimedia GmbH
Rapps, Peter, Dipl.-Phys.	Robert Bosch GmbH
Raste, Thomas, Dr.	Continental AG
Rausch, Herbert, Dr.-Ing.	Technische Universität München
Reichart, Günter, Dr.-Ing.	vormals BMW AG
Reimann, Gerd, Dipl.-Ing. (TH)	ZF Lenksysteme GmbH
Reissing, Jörg, Dr.-Ing.	BMW Motorrad
Remfrey, James, Dipl.-Ing.	Continental AG
Richter, Thorsten, Dipl.-Ing.	BMW Group
Rieth, Peter E., Dr.-Ing.	Continental AG
Ringbeck, Thorsten, Dr.-Ing.	PMD Technologies GmbH
Rohlfs, Michael, Dr.-Ing.	Volkswagen AG
Schepers, Heiner, Dipl.-Ing. (BA)	Robert Bosch Car Multimedia GmbH
Schiele, Bernt, Prof. Dr.	Technische Universität Darmstadt
Schmitt, Stefan, Dipl.-Ing.	Continental AG

Schmittner, Bernhard, Dipl.-Ing.	Continental AG
Schöning, Volkmar, Dipl.-Ing.	Volkswagen AG
Schorn, Matthias, Dr.-Ing.	Continental AG
Schreiber, Michael, Dipl.-Wirtsch.-Ing.	Technische Universität Darmstadt
Schroven, Frank, Dipl.-Ing.	Volkswagen AG
Schwertberger, Walter, Dipl.-Ing. (FH)	MAN Nutzfahrzeuge AG
Schwitters, Frank, Dipl.-Ing.	Volkswagen AG
Seeck, Andre, Dipl.-Ing.	Bundesanstalt für Straßenwesen
Seiniger, Patrick, Dipl.-Ing.	Technische Universität Darmstadt
Spichalsky, Carsten, Dipl.-Ing.	Volkswagen AG
Stählin, Ulrich, Dr.-Ing.	Continental AG
Steinle, Joachim, Dr.-Ing.	BMW Group
Steinmeyer, Simon, Dipl.-Inf.	Volkswagen AG
Stiller, Christoph, Prof. Dr.-Ing.	Universität Karlsruhe (TH)
Thiel, Robert, Dipl.-Ing.	Continental AG
van Zanten, Anton, Dr.	vormals Robert Bosch GmbH
Völkel, Jürgen, Dipl.-Ing.	Continental AG
Walter, Michael, Dr.	vormals Continental AG
Winner, Hermann, Prof. Dr. rer. nat.	Technische Universität Darmstadt
Wojek, Christian, Dipl.-Inform.	Technische Universität Darmstadt
Wolf, Gabriele, Dipl.-Wirtsch.-Ing.	Technische Universität Darmstadt
Woyna, Lars, Dipl.-Ing.	Technische Universität Darmstadt
Wuttke, Ulrich, Dipl.-Ing.	Volkswagen AG

Firmen- und Hochschulverzeichnis

Firmen

Audi AG	Dr.-Ing. Thomas Bock
	Dr. Wolfgang Huhn
BMW Group	Dr. Jürgen Bielefeld
	Dr.-Ing. Edmund Donges (vormals)
	Dipl.-Ing. Matthias Hopstock
	Dr.-Ing. Felix Klanner
	Dr.-Ing. Philip Köhn
	Dr.-Ing. Günter Reichart (vormals)
	Dipl.-Ing. Thorsten Richter
	Dr.-Ing. Joachim Steinle
BMW Motorrad	Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Bachmann
	Dr.-Ing. Jörg Reissing
Bundesanstalt für Straßenwesen	Ass. jur. Tom Michael Gasser
	Dr. Christhard Gelau
	Dipl.-Ing. Andre Seeck
Continental AG	Dr.-Ing. Bernward Bayer
	Dr.-Ing. Eva Bender
	Dipl.-Ing. Axel Büse
	Dr.-Ing. Michael Darms
	Dipl.-Ing. Alfred Eckert
	Dipl.-Ing. Thomas Fechner
	Dipl.-Ing. Steffen Gruber
	Dipl.-Ing. Wladimir Hellmann
	Dr.-Ing. Jens Hoffmann
	Dipl.-Ing. Norbert Ocvirk
	Dipl.-Ing. Bernd Piller
	Dr. Thomas Raste
	Dipl.-Ing. James Remfrey
	Dr.-Ing. Peter E. Rieth
	Dipl.-Ing. Stefan Schmitt
	Dipl.-Ing. Bernhard Schmittner
	Dr.-Ing. Matthias Schorn
	Dr.-Ing. Ulrich Stählin
	Dipl.-Ing. Robert Thiel

Continental AG (Fortsetzung)	Dipl.-Ing. Jürgen Völkel
	Dr. Michael Walter (vormals)
Daimler AG	Dr.-Ing. Jörg Breuer
	Dipl.-Ing. Bernd Danner
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	Dr.-Ing. Frank Flemisch
	Dipl.-Ing. Christian Löper
Honda R&D Europe (Deutschland) GmbH	Dr.-Ing. Jens E. Gayko
IF+F Ingenieurbüro für Fahrerassistenz und Fahrerinformation	Prof. Dr.-Ing. Peter Knoll
Knorr-Bremse	Dr. Falk Hecker
MAN Nutzfahrzeuge AG	Dipl.-Ing. Karlheinz Dörner
	Dipl.-Ing. Eberhard Hipp
	Dipl.-Ing. (FH) Walter Schwertberger
PMD Technologies GmbH	Dr. Bernd Buxbaum
	Dr.-Ing. Robert Lange
	Dr.-Ing. Thorsten Ringbeck
Omron Electronics GmbH	Georg Geduld (vormals)
Robert Bosch Car Multimedia GmbH	Dipl.-Ing. Ulrich Kersken
	Dr.-Ing. Thomas Kleine-Besten
	Dr.-Ing. Werner Pöchmüller
	Dipl.-Ing. (BA) Heiner Schepers
Robert Bosch GmbH	Dr.-Ing. Winfried König
	Dipl.-Ing. Friedrich Kost
	Dipl.-Ing. Matthias Mörbe
	Dr. Martin Noll
	Dipl.-Phys. Peter Rapps
	Dr. Anton van Zanten (vormals)
TRW Automotive	Dr.-Ing. Mark Mages
Volkswagen AG	Dr. rer. nat. Richard Auer
	Dr.-Ing. Arne Bartels
	Dr.-Ing. Stefan Brosig
	Dipl.-Ing. Reiner Katzwinkel
	Dr.-Ing. Michael Rohlfs
	Dipl.-Ing. Volkmar Schöning
	Dipl.-Ing. Frank Schroven
	Dipl.-Ing. Frank Schwitters
	Dipl.-Ing. Carsten Spichalsky
	Dipl.-Inf. Simon Steinmeyer
	Dipl.-Ing. Ulrich Wuttke

ZF Lenksysteme GmbH	Dipl.-Ing. (FH) Peter Brenner
	Dipl.-Ing. (TH) Hendrik Büring
	Dipl.-Ing. (TH) Gerd Reimann

Hochschulen

Technische Universität Braunschweig	Prof. Dr.-Ing. Markus Maurer
Technische Universität Darmstadt	Dr.-Ing. Bettina Abendroth
	Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder
	Dr. Muriel Didier
	Dipl.-Ing. Stephan Hakuli
	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Rolf Isermann
	Prof. Dr.-Ing. Tran Quoc Khanh
	Prof. Dr.-Ing. Kurt Landau (vormals)
	Prof. Dr. Bernt Schiele
	Dipl.-Wirtsch.-Ing. Michael Schreiber
	Dipl.-Ing. Patrick Seiniger
	Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
	Dipl.-Inform. Christian Wojek
	Dipl.-Wirtsch.-Ing. Gabriele Wolf
	Dipl.-Ing. Lars Woyna
Technische Universität München	Dr.-Ing. Herbert Rausch
Universität Karlsruhe (TH)	MSc Alexander Bachmann
	Dipl.-Ing. Christian Duchow
	Dr.-Ing. Sören Kammel (vormals)
	Prof. Dr.-Ing. Peter Knoll
	Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller

Inhaltsverzeichnis

Einleitung ... 1

A Grundlagen der Fahrerassistenzsystementwicklung ... 3

1 Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung ... 4
1.1 Menschlicher Informationsverarbeitungsprozess ... 4
1.1.1 Informationsaufnahme ... 5
1.1.2 Informationsverarbeitung ... 6
1.1.3 Informationsabgabe ... 8
1.2 Fahrercharakteristik und die Grenzen menschlicher Leistungsfähigkeit ... 8
1.3 Anforderungen an den Fahrzeugführer im System Fahrer-Fahrzeug-Umgebung ... 10
1.4 Bewertung der Anforderungen aus der Fahrzeugführungsaufgabe im Hinblick auf die menschliche Leistungsfähigkeit ... 12

2 Fahrerverhaltensmodelle ... 15
2.1 Drei-Ebenen-Modell für zielgerichtete Tätigkeiten des Menschen nach Rasmussen, 1983 15
2.2 Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe nach Donges, 1982 ... 16
2.3 Beispiel eines regelungstechnischen Modellansatzes für die Führungs- und Stabilisierungsebene der Fahraufgabe ... 17
2.4 Zeitkriterien ... 19
2.5 Neuer Ansatz zur Quantifizierung von fertigkeits-, regel- und wissensbasiertem Verhalten im Straßenverkehr ... 20
2.6 Folgerungen für Fahrerassistenzsysteme ... 22

3 Fahrerassistenz und Verkehrssicherheit ... 24
3.1 Einleitung ... 24
3.2 Erwartete Auswirkungen von Fahrerassistenzsystemen auf die Verkehrssicherheit ... 24
3.3 Bewertung von Fahrerassistenzsystemen vor dem Hintergrund von Ratings und gesetzlichen Vorschriften ... 27
3.3.1 Typzulassungsbestimmungen ... 27
3.3.2 Anforderungen der Verbraucherorganisationen ... 27
3.3.3 Herstellerinterne Anforderungen ... 28
3.3.4 Beyond NCAP – Die zukünftige Euro NCAP-Bewertung ... 28
3.4 Rechtliche Grenzen autonom eingreifender Fahrerassistenzsysteme ... 29

4 Nutzergerechte Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion von Fahrerassistenzsystemen ... 33
4.1 Übersicht ... 33
4.2 Fragestellungen bei der Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion (HMI) von FAS 33
4.2.1 Unterstützung durch FAS ... 33
4.2.2 Leistungen und Grenzen der FAS ... 33
4.2.3 Benötigte Kompetenzen und Fachbereiche ... 34
4.2.4 Einflussfaktoren bei der Entwicklung von FAS ... 34
4.2.5 Interaktionskanäle zwischen Fahrer, FAS und Fahrzeug ... 34
4.2.6 Änderung der Beziehung Fahrer-Fahrzeug durch FAS ... 35
4.2.7 Situationsbewusstsein des Fahrers ... 36
4.2.8 Inneres Modell ... 36
4.2.9 Entlastung oder Belastung durch FIS und FAS? ... 37
4.2.10 Verantwortung des Fahrers ... 37
4.2.11 Stärken von Mensch und Maschine ... 37

4.3 Systematische Entwicklung des HMI von FAS 37
4.3.1 Die Entwicklung des HMI im FAS-Entwicklungsprozess 37
4.3.2 Unterstützungsbedarf des Fahrers 38
4.3.3 Leitlinien zur Entwicklung von FIS und FAS 38
4.3.4 Richtlinien für FIS – „European Statements of Principles on HMI“ (ESoP) . . . 39
4.3.5 Normen zur Gestaltung von FIS und FAS 39
4.3.6 Entwicklung von Normen 40
4.3.7 ISO-Normen zu HMI im Kfz 40
4.4 Bewertung von FAS-Gestaltungen 40
4.5 Zusammenfassung 42

5 Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen 43
5.1 Begriffsklärung „Fahrerassistenzsysteme“ 43
5.2 Motivation des Beitrags 44
5.3 Fahrerassistenzsysteme aus Sicht des Fahrers 44
5.4 Systematischer Entwurf von Fahrerassistenzsystemen 45
5.5 Systematischer Entwurf einer „Automatischen Notbremse“ 47
5.5.1 Nutzerorientierte Funktionsdefinition 47
5.5.2 Aspekte der Systemarchitektur 50
5.5.3 Funktionale Tests von Fahrerassistenzsystemen 51
5.5.4 Testfall „berechtigte Auslösung“ – Vehicle-in-the-Loop 51
5.5.5 Fehlerwahrscheinlichkeit für „unberechtigte Auslösung“ – trojanische Pferde 52
5.6 Zusammenfassung 52

6 Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen 55
6.1 Zielsetzung der nutzerorientierten Bewertung 55
6.2 Anforderungen an Bewertungsverfahren 55
6.3 Eingesetzte Verfahren 57
6.3.1 Versuche an Fahrsimulatoren 57
6.3.2 Versuche auf Testgeländen (kontrolliertes Feld) 58
6.3.3 Versuche im realen Straßenverkehr (Feldversuche) 58
6.4 Exemplarische Anwendungen 59
6.4.1 Bewertung von Sicherheitssystemen am Fahrsimulator 59
6.4.2 Bewertung einer Sicherheitsfunktion in Versuchen auf einem Testgelände . . . 63
6.4.3 Bewertung von Assistenzfunktion in Versuchen im realen Straßenverkehr . . . 65

7 EVITA – Das Prüfverfahren zur Beurteilung von Antikollisionssystemen 69
7.1 Einleitung 69
7.2 Bisher bekannte Testverfahren 69
7.3 Das Dummy Target EVITA 70
7.3.1 Ziele 70
7.3.2 Konzept 70
7.3.3 Aufbau 71
7.3.4 Versuchsablauf 71
7.3.5 Leistungsdaten 72
7.4 Messkonzept im Versuchsfahrzeug 72
7.5 Gefährdungen von Versuchsteilnehmern 72
7.6 Bewertungsmethode 73
7.6.1 Wirksamkeit eines Antikollisionssystems 73
7.6.2 Probandenversuch 73
7.6.3 Beurteilungszeitraum 73
7.6.4 Vergleiche von Antikollisionssystemen 74
7.7 Ergebnisse 75

8 Bewertung von Fahrerassistenzsystemen mittels der Vehicle in the Loop-Simulation ... 76
8.1 Motivation ... 76
8.2 Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen ... 76
8.3 Vehicle in the Loop ... 79
8.3.1 Verkehrssimulation und Visualisierung ... 80
8.3.2 Positionierung des Versuchsträgers in der Verkehrssimulation ... 80
8.3.3 Einbindung des Fahrers mithilfe von Augmented Reality ... 80
8.3.4 Sensormodelle ... 81
8.4 Gesamtarchitektur des Vehicle in the Loop ... 81
8.5 Validierung des Vehicle in the Loop ... 82
8.6 Ausblick ... 83

9 Einflüsse von Fahrerassistenzsystemen auf die Systemarchitektur im Kraftfahrzeug ... 84
9.1 Einleitung ... 84
9.2 Systemarchitektur ... 85
9.3 Wichtige Einflüsse von Fahrerassistenzsystemen auf die Systemarchitektur ... 86
9.4 Ausstattungsvarianz und Vernetzungskomplexität ... 87
9.5 Partitionierung von FAS-Funktionen auf Steuergeräte ... 88
9.6 Vernetzungstechnologien ... 91
9.7 Zusammenfassung und Ausblick ... 92

B Sensorik für Fahrerassistenzsysteme ... 93

10 Fahrdynamik-Sensoren für FAS ... 94
10.1 Einleitung ... 94
10.2 Allgemeine Auswahlkriterien ... 94
10.2.1 Anforderungen Technikebene ... 95
10.2.2 Kommerzielle Ebene ... 97
10.3 Technische Sensorkenndaten für Fahrerassistenzsysteme ... 98
10.3.1 Sensoren und Einbauorte ... 98
10.3.2 Raddrehzahlsensor DF ... 99
10.3.3 Lenkradwinkelsensoren ... 101
10.3.4 Drehraten- und Beschleunigungssensoren ... 104
10.3.5 Bremsdrucksensoren ... 106

11 Ultraschallsensorik ... 110
11.1 Piezoelektrischer Effekt ... 110
11.2 Piezoelektrische Keramiken ... 110
11.2.1 Materialien ... 110
11.2.2 Herstellung ... 111
11.2.3 Hysterese ... 112
11.2.4 Piezoelektrische Konstanten ... 112
11.2.5 Depolarisation ... 113
11.3 Ultraschallwandler ... 113
11.3.1 Ersatzschaltbild ... 114
11.4 Ultraschallsensoren für das Kfz ... 115
11.4.1 Sensorbaugruppen ... 115
11.5 Antennen und Strahlgestaltung ... 117
11.5.1 Simulation ... 117
11.6 Entfernungsmessung ... 119
11.7 Halter- und Befestigungskonzepte ... 120
11.8 Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit ... 120
11.9 Zusammenfassung und Ausblick ... 121

12 Radarsensorik 123
12.1 Ausbreitung und Reflektion 123
12.2 Abstands- und Geschwindigkeitsmessung 126
12.2.1 Grundprinzip Modulation und Demodulation 126
12.2.2 Doppler-Effekt 127
12.2.3 Mischen von Signalen 127
12.2.4 Pulsmodulation 129
12.2.5 Frequenzmodulation 131
12.3 Winkelmessung 140
12.3.1 Antennen-theoretische Vorbetrachtungen 140
12.3.2 Scanning 141
12.3.3 Monopuls 142
12.3.4 Mehrstrahler 143
12.3.5 Dual-Sensor-Konzept 144
12.4 Hauptparameter der Leistungsfähigkeit 145
12.4.1 Abstand 145
12.4.2 Relativgeschwindigkeit 145
12.4.3 Azimutwinkel 146
12.4.4 Leistungsfähigkeit und Mehrzielfähigkeit 146
12.4.5 24 GHz vs. 77 GHz 147
12.5 Signalverarbeitung und Tracking 148
12.6 Einbau und Justage 150
12.7 Elektromagnetische Verträglichkeit 151
12.8 Ausführungsbeispiele 152
12.8.1 Bosch LRR2 152
12.8.2 Bosch LRR3 153
12.8.3 Continental (A.D.C.) ARS200 157
12.8.4 Continental ARS 300 159
12.8.5 Delphi Forward Looking Radar (3. Generation) 162
12.8.6 Delphi Electronic Scanning Radar (4. Generation) 162
12.8.7 Hella 24 GHz-Mid Range Radar 166
12.8.8 TRW AC20 168
12.9 Zusammenfassung und Ausblick 169

13 Lidarsensorik 172
13.1 Funktion, Prinzip 172
13.1.1 Begrifflichkeit 172
13.1.2 Messverfahren Distanzsensor 172
13.1.3 Aufbau 174
13.1.4 Transmissions- und Reflexionseigenschaften 177
13.1.5 Trackingverfahren und Auswahl relevanter Ziele 179
13.2 Applikation im Fahrzeug 181
13.2.1 Laserschutz 181
13.2.2 Integration für nach vorne gerichtete Sensoren (zum Beispiel für ACC) 181
13.3 Zusatzfunktionen 182
13.4 Aktuelle Beispiele 183
13.5 Ausblick 185

14 3D-Imaging 187
14.1 Einordnung und Erläuterung des Grundkonzeptes 187
14.2 Vorteile und Applikationen 187
14.3 Grundsätzliche Lösungen zur 3D-Erfassung 188
14.3.1 Formerfassung mit optisch inkohärenter Modulationslaufzeitmessung 189
14.3.2 Das PMD-Prinzip 191
14.4 Module eines PMD-Systems 192

14.4.1 PMD-Imager: 2D-Mischer und Integrator . . . 192
14.4.2 Beleuchtung . . . 194
14.4.3 Weiterverarbeitung (Merkmalsextraktion, Objekttracking) . . . 194
14.5 Leistungsfähigkeit und Leistungsgrenzen des Gesamtsystems . . . 196

15 Maschinelles Sehen . . . 198
15.1 Bildsensor . . . 198
15.1.1 Hardwarekomponenten und Technologie . . . 198
15.1.2 Projektive Abbildung . . . 199
15.1.3 Bildrepräsentation . . . 201
15.2 Bildverarbeitung . . . 202
15.2.1 Bildvorverarbeitung . . . 202
15.2.2 Merkmalsextraktion . . . 205
15.3 3d-Rekonstruktion der Szenengeometrie . . . 208
15.3.1 Stereoskopie . . . 208
15.3.2 Motion-Stereo . . . 210
15.3.3 Trifokal-Tensor . . . 211
15.4 Zeitliche Verfolgung . . . 212
15.4.1 Bayes-Filter . . . 213
15.4.2 Zeitliche Verfolgung mit dem Kalman-Filter . . . 214
15.5 Anwendungsbeispiele . . . 214
15.5.1 Fahrstreifenerkennung . . . 214
15.5.2 Objektdetektion . . . 216
15.6 Zusammenfassung und Ausblick . . . 220

16 Kamerabasierte Fußgängerdetektion . . . 223
16.1 Anforderungen . . . 223
16.2 Mögliche Ansätze . . . 224
16.3 Beschreibung des Funktionsprinzips . . . 225
16.4 Beschreibungen der Anforderungen an Hardware und Software . . . 233
16.5 Ausblick . . . 234

17 Fusion umfelderfassender Sensoren . . . 237
17.1 Definition Sensordatenfusion . . . 237
17.1.1 Ziele der Datenfusion . . . 238
17.2 Hauptkomponenten der Sensordatenverarbeitung . . . 239
17.2.1 Signalverarbeitung und Merkmalsextraktion . . . 239
17.2.2 Datenassoziation . . . 240
17.2.3 Datenfilterung . . . 242
17.2.4 Klassifikation . . . 242
17.2.5 Situationsanalyse . . . 243
17.3 Architekturmuster zur Sensordatenfusion von Umfeldsensoren . . . 243
17.3.1 Dezentral – Zentral – Hybrid . . . 243
17.3.2 Rohdaten-Ebene – Merkmals-Ebene – Entscheidungs-Ebene . . . 244
17.3.3 Synchronisiert – Unsynchronisiert . . . 245
17.3.4 Neue Daten – Datenkonstellation – Externes Ereignis . . . 246
17.3.5 Originaldaten – Gefilterte Daten – Prädizierte Daten . . . 246
17.3.6 Parallel – Sequenziell . . . 246
17.4 Abschließende Bemerkung . . . 247

C Aktorik für Fahrerassistenzsysteme . . . 249

18 Hydraulische Pkw-Bremssysteme . . . 250
18.1 Standardarchitektur . . . 250
18.2 Architektur der Elektrohydraulischen Bremse EHB . . . 259
18.3 Architektur eines Regenerativen Bremssystems (RBS) . . . 267

19 Elektromechanische Bremssysteme 271
19.1 Elektromechanisches Bremssystem (EMB) 271
19.1.1 Motivation 271
19.1.2 Systemarchitektur und Komponenten 271
19.1.3 Betätigungseinrichtung 273
19.1.4 Zentralsteuergerät 275
19.1.5 Radbremsen-Aktor 275
19.1.6 Sensorik 276
19.1.7 Regelkonzepte 276
19.1.8 Energieversorgung 276
19.1.9 Kommunikationssystem (Bus-Struktur) 277
19.2 Hybrid-Bremssystem 278
19.2.1 Motivation 278
19.2.2 Systemarchitektur und Komponenten 278
19.2.3 Regelfunktionen 279
19.2.4 Hinterachs-Aktor 280
19.3 Elektrische Parkbremse (EPB) 280
19.3.1 Motivation 280
19.3.2 Systemarchitektur und Komponenten 280
19.3.3 Schnittstellen des elektronischen Steuergeräts 284
19.3.4 Funktionen der EPB 284

20 Lenkstellsysteme 287
20.1 Allgemeine Anforderungen an Lenksysteme 287
20.2 Basislösungen der Lenkunterstützung 287
20.2.1 Die hydraulische Hilfskraftlenkung (HPS) 287
20.2.2 Die parametrierbare hydraulische Hilfskraftlenkung 288
20.2.3 Die elektrohydraulische Hilfskraftlenkung (EHPS) 289
20.2.4 Die elektromechanische Hilfskraftlenkung (EPS) 290
20.2.5 Elektrische Komponenten 294
20.3 Lösungen zur Überlagerung von Momenten 295
20.3.1 Zusatzaktor für hydraulische Lenksysteme 296
20.3.2 Elektrische Lenksysteme 297
20.4 Lösungen zur Überlagerung von Winkeln 299
20.4.1 Einleitung 299
20.4.2 Funktionalität 300
20.4.3 Stellervarianten 300
20.4.4 Einsatzbeispiel BMW E60 – ZFLS-Aktor am Lenkgetriebe 302
20.4.5 Einsatzbeispiel Audi A4 – ZFLS-Aktor in der Lenksäule 304
20.4.6 Einsatzbeispiel Lexus – koaxialer Lenksäulenaktor lenkwellenfest 307
20.5 Steer-by-Wire-Lenksystem und Einzelradlenkung 309
20.5.1 Systemkonzept und Bauteile 310
20.5.2 Technik, Vorteile und Chancen 311

D Mensch-Maschine-Schnittstelle für Fahrerassistenzsysteme 313

21 Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen 314
21.1 Ein Arbeitsmodell von Mensch-Maschine-Schnittstellen 314
21.2 Grundeinteilung der Schnittstellen 315
21.2.1 Bedienelemente 315
21.2.2 Anzeige 316
21.3 Gestaltungsleitsätze und -prinzipien 317
21.3.1 Gestaltungsleitsätze 317
21.3.2 Gestaltungsprinzipien 319

21.4 Gestaltungsprozess ... 320
21.5 Praxis und Gestaltungsprozess ... 323

22 Bedienelemente ... 325
22.1 Anforderungen an Bedienelemente ... 325
22.2 Bestimmung des Handlungsorgans, der Körperhaltung und der Greifart ... 326
22.3 Festlegung der Bedienteilart ... 326
22.4 Vermeiden von unbefugtem und unbeabsichtigtem Stellen ... 326
22.5 Festlegung der räumlichen Anordnung ... 327
22.6 Festlegung von Bedienrichtung, -weg und -widerstand ... 328
22.7 Festlegung von Form, Abmessungen, Material und Oberfläche ... 328
22.8 Kennzeichnung der Stellteile ... 329
22.9 Alternative Bedienkonzepte ... 329

23 Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme ... 330
23.1 Anforderungen an Displays im Kraftfahrzeug ... 330
23.1.1 Interaktionskanäle ... 330
23.1.2 „Code of Practice“ ... 330
23.2 Heutige Displaykonzepte im Kraftfahrzeug ... 331
23.2.1 Kommunikationsbereiche im Fahrzeug ... 331
23.2.2 Displays für das Kombiinstrument ... 332
23.2.3 Head-up-Display (HUD) ... 334
23.2.4 Zentrale Anzeige- und Bedieneinheit in der Mittelkonsole ... 335
23.2.5 Displays für Nachtsichtsysteme ... 335
23.2.6 Zusatzdisplays ... 336
23.3 Anzeigen für das Kraftfahrzeug ... 336
23.3.1 Elektromechanische Messwerke ... 337
23.3.2 Aktive und passive Segmentdisplays ... 338
23.3.3 Graphikanzeigen für Kombiinstrument und Mittelkonsole ... 340
23.4 Zukünftige Displaykonzepte im Kraftfahrzeug ... 341
23.4.1 Kontaktanaloges Head-up-Display ... 341
23.4.2 Laserprojektion ... 342

24 Fahrerwarnelemente ... 343
24.1 Einleitung ... 343
24.2 Menschliche Informationsverarbeitung ... 343
24.3 Schnittstellen zwischen Mensch und Maschine ... 344
24.4 Anforderungen an Warnelemente ... 345
24.5 Beispiele für Warnelemente ... 345
24.5.1 Warnelemente für die Längsführung ... 346
24.5.2 Warnelemente der Querführung ... 347
24.6 Voreinteilung von Warnelementen ... 348
24.7 Bewertungskriterien für warnende Frontalkollisionsgegenmaßnahmen ... 350
24.8 Ergebnisse für Frontalkollisionswarnungen ... 352

E Fahrerassistenz auf Stabilisierungsebene ... 355

25 Bremsenbasierte Assistenzfunktionen ... 356
25.1 Einleitung ... 356
25.2 Grundlagen der Fahrdynamik ... 356
25.2.1 Stationäres und instationäres Reifen- und Fahrverhalten ... 356
25.2.2 Kenngrößen der Fahrdynamik ... 359
25.3 ABS, ASR und MSR ... 360
25.3.1 Regelkonzepte ... 360

25.4 ESP 363
25.4.1 Anforderungen 363
25.4.2 Eingesetzte Sensoren 364
25.4.3 Regelkonzept des ESP 366
25.4.4 Sollwertbildung und Schätzung fahrdynamischer Größen 374
25.4.5 Sicherheitskonzept 379
25.5 Mehrwertfunktionen 381
25.5.1 Special Stability Support 381
25.5.2 Special Torque Control 385
25.5.3 Brake & Boost Assist 386
25.5.4 Standstill & Speed Control 390
25.5.5 Advanced Driver Assistance System Support 392
25.5.6 Monitoring & Information 393
25.6 Unterschiede zu EHB-basierten Bremsregelsystemen 393
25.7 Ausblick 394

26 Fahrerassistenz auf der Stabilisierungsebene 395
26.1 Fahrdynamikregelung mit Brems- und Lenkeingriff 395
26.1.1 Systemkontext und Benutzeranforderungen 396
26.1.2 Konzept und Wirkprinzip der Brems- und Lenkregelung 396
26.1.3 Funktionsmodule zum Lenkwinkeleingriff 398
26.1.4 Funktionsmodule zur Fahrerlenkempfehlung 399
26.1.5 Zukünftige Entwicklungen 401

27 Fahrdynamikregelsysteme für Motorräder 404
27.1 Fahrstabilität 404
27.2 Bremsstabilität 407
27.3 Für Fahrdynamikregelungen relevantes Unfallgeschehen von Motorrädern 410
27.4 Stand der Technik der Bremsregelsysteme 410
27.4.1 Hydraulische ABS-Bremsanlagen 411
27.4.2 Elektrohydraulische Integralbremsanlagen 412
27.5 Stand der Technik der Antriebsschlupfregelungssysteme 415
27.6 Zukünftige Fahrdynamikregelungen 417

28 Stabilisierungsassistenzfunktionen im Nutzfahrzeug 422
28.1 Einleitung 422
28.2 Spezifika von ABS, ASR und MSR für Nutzfahrzeuge im Vergleich zum Pkw 422
28.2.1 Nkw-spezifische Besonderheiten 422
28.2.2 Regelungsziele und -prioritäten 424
28.2.3 Systemaufbau, Steller 427
28.2.4 Sonderfunktionen für Nkw 430
28.3 Spezifika der Fahrdynamikregelung für Nutzfahrzeuge im Vergleich zum Pkw 430
28.3.1 Nkw-spezifische Besonderheiten 430
28.3.2 Regelungsziele und -prioritäten 431
28.3.3 Systemarchitektur 434
28.3.4 Sonderfunktionen für Nkw 435
28.4 Ausblick 435
28.4.1 Fahrdynamikregelung für Gliederzüge 436
28.4.2 Nutzung weiterer Steller 436

29 Lenkassistenzfunktionen 438
29.1 Lenkübersetzung 438
29.2 Lenkmomentunterstützung 438
29.3 Lenkwinkelunterstützung 441
29.3.1 Ergonomie 442

29.3.2 Lenkverhalten . . . 442
29.4 Fahrerunabhängige Lenkeingriffe . . . 445
29.4.1 Fahrverhalten und Fahrstabilität . . . 445
29.4.2 Assistenzfunktionen zur Bahnführung . . . 445
29.5 Fahrerakzeptanz . . . 446
29.6 Ausblick . . . 446

F Fahrerassistenz auf Bahnführungs- und Navigationsebene . . . 447

30 Sichtverbesserungssysteme . . . 448
30.1 Häufigkeit von Verkehrsunfällen bei Nacht oder ungünstigen Witterungsverhältnissen 448
30.2 Lichttechnische und fahrzeugtechnische Konsequenzen für Sichtverbesserungssysteme 452
30.3 Derzeitige und zukünftige Scheinwerfersysteme zur Sichtverbesserung . . . 455
30.3.1 Sichtverbesserungssysteme auf der Basis der Lichtquellenentwicklung . . . 455
30.3.2 Sichtverbesserungssysteme auf Basis der adaptiven Lichtverteilung . . . 456
30.3.3 Sichtverbesserungssysteme auf Basis der assistierenden Lichtverteilung . . . 462
30.4 Nachtsichtsysteme . . . 465
30.4.1 Sensorik für Nachtsichtsysteme im Kraftfahrzeug . . . 465
30.4.2 Anzeigen für Nachtsichtsysteme im Kraftfahrzeug . . . 468
30.4.3 Bildverarbeitung . . . 469
30.4.4 Vergleich der Systemansätze . . . 469

31 Einparkassistenz . . . 471
31.1 Abstufungen der Einparkassistenz . . . 471
31.2 Anforderungen an Einparkassistenzsysteme . . . 471
31.3 Technische Realisierungen . . . 472
31.3.1 Informierende Einparkassistenzsysteme . . . 472
31.3.2 Geführte Einparkassistenz . . . 473
31.3.3 Semiautomatisches Einparken . . . 475
31.4 Ausblick . . . 476

32 Adaptive Cruise Control . . . 478
32.1 Einleitung . . . 478
32.2 Rückblick auf die Entwicklung von ACC . . . 479
32.3 Anforderungen . . . 480
32.3.1 Funktionsanforderungen für Standard-ACC nach ISO 15622 . . . 480
32.3.2 Zusätzliche Funktionsanforderungen für FSR-ACC nach ISO 22179 . . . 481
32.4 Systemstruktur . . . 482
32.4.1 Beispiel Mercedes-Benz Distronic . . . 482
32.4.2 Beispiel BMW FSR-ACC-System . . . 483
32.4.3 Funktionsabstufungen . . . 483
32.5 ACC-Zustandsmanagement und Mensch-Maschine-Schnittstelle . . . 485
32.5.1 Systemzustände und Zustandsübergänge . . . 485
32.5.2 Bedienelemente mit Ausführungsbeispielen . . . 487
32.5.3 Anzeigeelemente mit Ausführungsbeispielen . . . 488
32.6 Zielobjekterkennung für ACC . . . 491
32.6.1 Anforderungen an die Umfeldsensorik . . . 491
32.6.2 Messbereiche und Messgenauigkeit . . . 491
32.7 Zielauswahl . . . 496
32.7.1 Bestimmung der Kurskrümmung . . . 497
32.7.2 Kursprädiktion . . . 498
32.7.3 Fahrschlauch . . . 498
32.7.4 Weitere Kriterien für die Zielauswahl . . . 500
32.7.5 Grenzen der Zielauswahl . . . 501

32.8 Folgeregelung . . . 502
32.8.1 Grundsätzliche Betrachtungen zur Folgeregelung . . . 502
32.8.2 Fuzzy-Folgeregler . . . 506
32.9 Zielverluststrategien und Kurvenregelung . . . 506
32.9.1 Annäherungsstrategien . . . 509
32.9.2 Überholunterstützung . . . 509
32.9.3 Reaktion auf stehende Ziele . . . 510
32.9.4 Anhalteregelung, Spezifika der Low-Speed-Regelung . . . 510
32.10 Längsregelung und Aktorik . . . 510
32.10.1 Grundstruktur und Koordination Aktorik . . . 510
32.10.2 Bremse . . . 511
32.10.3 Antrieb . . . 513
32.11 Nutzungs- und Sicherheitsphilosophie . . . 515
32.11.1 Nachvollziehbarkeit der Funktion . . . 515
32.11.2 Systemgrenzen . . . 515
32.12 Sicherheitskonzept . . . 516
32.13 Nutzer- und Akzeptanzstudien . . . 517
32.13.1 Akzeptanz . . . 517
32.13.2 Nutzung . . . 517
32.13.3 Kompensationsverhalten . . . 518
32.13.4 Habituationseffekte . . . 519
32.13.5 Übernahmesituationen . . . 519
32.13.6 Komfortbeurteilung . . . 520
32.14 Ausblick . . . 520
32.14.1 Aktuelle Entwicklungen . . . 520
32.14.2 Funktionserweiterungen . . . 520

33 Frontalkollisionsschutzsysteme . . . 522
33.1 Problemstellung . . . 522
33.2 Frontalunfallschutz durch präventive Assistenz . . . 523
33.3 Reaktionsunterstützung . . . 523
33.4 Notmanöver . . . 524
33.5 Bremsassistenz . . . 524
33.5.1 Basisfunktion . . . 524
33.5.2 Weiterentwicklungen . . . 527
33.6 Warn- und Eingriffszeitpunkte . . . 528
33.6.1 Fahrdynamische Betrachtungen . . . 528
33.6.2 Frontalkollisionsgegenmaßnahmen . . . 535
33.6.3 Nutzenpotenzial für Kollisionsgegenmaßnahmen . . . 537
33.6.4 Anforderungen an die Umfelderfassung . . . 539
33.7 Ausblick . . . 540

34 Lane Departure Warning . . . 543
34.1 Fahrstreifenerkennungssysteme und ihre Anwendung . . . 543
34.2 Ein Blick auf die Unfalldaten . . . 543
34.3 Fahrstreifenerkennungssysteme . . . 545
34.3.1 Umwelteinflüsse und begrenzende Faktoren . . . 546
34.3.2 Länderspezifische Unterschiede . . . 547
34.4 Funktionsausprägungen . . . 548
34.4.1 Lane Departure Warning-System (LDW) . . . 548
34.4.2 Advanced Lane Departure Warning-System (ALDW) . . . 549
34.4.3 Lane Keeping Support (LKS) . . . 550
34.4.4 Lane Departure Prevention (LDP) . . . 551
34.5 Erwartung für den Markt . . . 551

35 Lane Keeping Support 554
35.1 Funktionsübersicht 554
35.2 Lösungsansätze und technische Realisierung 556
35.2.1 Fahrstreifenerkennung 556
35.2.2 Regelstrategie 557
35.2.3 Mensch-Maschine-Schnittstelle 558
35.2.4 Aktoren 558
35.3 Grenzen des Systems 559
35.4 Ausblick 559

36 Fahrstreifenwechselassistenz 562
36.1 Motivation 562
36.2 Anforderungen 562
36.3 Klassifikation der Systemfunktionalität 563
36.3.1 Klassifikation nach Leistung der Umfelderfassung 564
36.3.2 Systemzustandsdiagramm 564
36.4 Lösungen und beispielhafte Umsetzungen 565
36.4.1 „Blind Spot Information System“ (BLIS) von Volvo 566
36.4.2 „Toter Winkel Detektor“ von Peugeot 566
36.4.3 „Totwinkel-Assistent“ von Mercedes-Benz 566
36.4.4 „Audi Side Assist“/„Side Assist“ von VW 568
36.4.5 Zusammenfassung 569
36.5 Erreichte Leistungsfähigkeit 570
36.6 Weiterentwicklungen 571

37 Kreuzungsassistenz 572
37.1 Unfallgeschehen an Kreuzungen 572
37.2 Kreuzungsassistenzsysteme 572
37.2.1 STOP-Schild-Assistenz 573
37.2.2 Ampelassistenz 574
37.2.3 Einbiege-/Kreuzenassistenz 575
37.2.4 Linksabbiegeassistenz 576
37.3 Situationsbewertung 578
37.4 Geeignete Warn- und Eingriffsstrategien 578
37.5 Herausforderungen bei der Umsetzung 579

38 Bahnführungsassistenz für Nutzfahrzeuge 582
38.1 Anforderungen an die Fahrer von Nutzfahrzeugen 582
38.2 Wesentliche Unterschiede zwischen Lkw und Pkw 584
38.3 Unfallszenarien 586
38.4 Adaptive Cruise Control (ACC) für Nutzfahrzeuge 588
38.5 Spurverlassenswarner für Nutzfahrzeuge 592
38.6 Notbremssysteme 595
38.7 Entwicklung für die Zukunft 596

39 Navigation und Telematik 599
39.1 Historie 599
39.2 Navigation im Fahrzeug 600
39.2.1 Ortung 601
39.2.2 Zieleingabe 604
39.2.3 Routensuche 605
39.2.4 Zielführung 606
39.2.5 Kartendarstellung 607
39.2.6 Dynamisierung 608
39.2.7 Korridor und Datenabstraktion (Datenträger) 608

39.3 Offboard-Navigation . . . 609
39.4 Hybrid-Navigation . . . 609
39.4.1 Kartendaten – aktuell und individuell . . . 611
39.5 Assistenzfunktionen . . . 612
39.6 Verkehrstelematik . . . 612
39.6.1 Rundfunkbasierte Technologien . . . 613
39.6.2 Mobilfunkbasierte Technologien . . . 614
39.6.3 Telematik Basisdienste . . . 616
39.6.4 Car-to-Car-Kommunikation, Car-to-Infrastructure-Kommunikation . . . 617
39.6.5 Mautsysteme . . . 618
39.6.6 Moderne Verkehrssteuerung . . . 618
39.6.7 Zukünftige Entwicklung von Telematikdiensten . . . 619
39.7 Herausforderungen für Navigation und Telematik . . . 620
39.7.1 Consumer-Elektronik (CE) versus Automobil-Elektronik (AE) . . . 620
39.7.2 Aufbau . . . 622
39.7.3 Entwicklungsprozess . . . 622

G Zukunft der Fahrerassistenzsysteme . . . 625

40 Das mechatronische Fahrwerk der Zukunft . . . 626
40.1 Das vernetzte Chassis . . . 626
40.2 Motivationen für Brake-by-Wire-Systeme . . . 629
40.3 Ausblick . . . 629

41 Antikollisionssystem PRORETA – Integrierte Lösung für ein unfallvermeidendes Fahrzeug . . . 632
41.1 Einleitung . . . 632
41.2 Ausstattung des Versuchsfahrzeugs . . . 632
41.3 Umfelderkennung durch Sensordatenfusion . . . 634
41.4 Eingriffsentscheidung für ein Notmanöver . . . 634
41.5 Algorithmen zur Fahrzeugregelung . . . 636
41.6 Zusammenspiel zwischen Fahrer und Fahrerassistenzsystem . . . 637
41.6.1 Ziel der Untersuchung . . . 637
41.6.2 Versuchskonzept . . . 638
41.6.3 Ergebnisse . . . 639
41.6.4 Fazit aus den Probandenversuchen . . . 641
41.7 Erprobung des Fahrerassistenzsystems in Fahrversuchen . . . 642
41.7.1 Umfelderfassung mit Laserscanner und Videosensor . . . 642
41.7.2 Blockierte Spur . . . 643
41.7.3 Einscherendes Fahrzeug . . . 645
41.8 Schlussbemerkung . . . 645

42 Kooperative Automation . . . 647
42.1 Einleitung und Motivation . . . 647
42.2 Aspekte der kooperativen Automation . . . 648
42.2.1 Parallel-simultane Assistenz . . . 648
42.2.2 Parallel-sequenzielle Assistenz . . . 649
42.2.3 Seriell-simultane Assistenz . . . 649
42.3.4 Seriell-sequenzielle Assistenz . . . 649
42.2.5 Weitere ergonomische Aspekte einer kooperativen Fahrzeugführung . . . 650
42.3 Umsetzungen . . . 651
42.3.1 Conduct-by-Wire . . . 651
42.3.2 H-Mode – die Umsetzung der Horse-Metapher . . . 653
42.4 Fazit und Ausblick . . . 655

43 Autonomes Fahren 657
43.1 Urban Challenge 2007 657
43.1.1 Systemaufbau 658
43.1.2 Software-Architektur 659
43.1.3 Informationsverarbeitungskette 660
43.1.4 Erfassung der Umgebung 661
43.1.5 Dynamische Objekte 661
43.1.6 Fahrstreifenerkennung 661
43.1.7 Missions- und Manöverplanung 661
43.1.8 Regelung 663
43.2 Zusammenfassung 663

44 Quo vadis, FAS? 664
44.1 Integrierte Bedienkonzepte für Fahrerassistenzsysteme 664
44.2 Verbesserung der Umweltbilanz durch FAS 664
44.3 Mobilitätsteigerung durch FAS 665
44.4 Aktive Kollisionsvermeidung 666
44.5 Autonomes Fahren 667
44.5.1 Problemfeld Zulassung 668
44.5.2 Ausweg aus dem Testdilemma 669
44.5.3 Möglicher Weg zu einer Metrik 671
44.6 Evolution der Fahrerassistenzsysteme 672

H Glossar 674

Sachwortverzeichnis 682

Einleitung

Das Thema Fahrerassistenzsysteme ist bei Automobilherstellern, Zulieferern und in der universitären Forschung seit geraumer Zeit aktuell und hat in den vergangenen Jahren auch das Interesse der Öffentlichkeit geweckt. Die Zahl der am Markt verfügbaren Systeme und ihr Funktionsumfang zur Unterstützung des Fahrers bei der Ausführung der Fahraufgabe nehmen stetig zu. Bedingt durch die jüngsten Entwicklungen wird der Begriff Fahrerassistenzsysteme (in unserer abgekürzten Welt kurz mit FAS bezeichnet) heute zumeist mit Systemen der Aktiven Sicherheit, d. h. Systemen, die das Eintreten eines Unfalls verhindern, in Verbindung gebracht. Tatsächlich kann dieser Begriff jedoch sehr viel breiter gefasst werden, denn schon mit der Erfindung des elektrischen Starters, der die manuelle Kurbel ablöste, war ein erstes Fahrerassistenzsystem geboren, das das Fahren erleichterte. Auch Dinge wie die automatische Blinkerhebelrückstellung oder das synchronisierte Handschaltgetriebe werden heute als Selbstverständlichkeiten angesehen, sind im eigentlichen Sinne jedoch als Fahrerassistenzsysteme zu verstehen.

Eine Einteilung der Fahrerassistenzsysteme kann nach unterschiedlichen Kriterien erfolgen. In diesem Buch sind die Themen anhand des 3-Ebenen-Modells von Donges aus dem Jahr 1982 kategorisiert (ausführlich erläutert wird dieses Modell in Kapitel 2). Bei dieser Einteilung wird unterschieden, auf welcher der drei Ebenen der Fahraufgabe – Stabilisierung, Bahnführung, Navigation – das Fahrerassistenzsystem agiert. ABS und ESP sind z. B. Systeme, die den Fahrer auf der Stabilisierungsebene unterstützen und ihm so helfen, die Gewalt über sein Fahrzeug zu behalten. ACC, präventive Kollisionsschutz-, aber auch Sichtverbesserungssysteme wirken auf der Bahnführungsebene, indem sie dem Fahrer bei der Trajektorienwahl und -haltung Hilfestellungen bieten. Die Aufgaben auf Navigationsebene schließlich werden heutzutage durch hochentwickelte Navigations- und Verkehrstelematiksysteme unterstützt, die ihre Wirkung nicht auf das einzelne Fahrzeug beschränken, sondern in ganzen Teilbereichen des Netzes die Verkehrsströme beeinflussen.

Allen Fahrerassistenzsystemen ist gemein, dass ihr Assistenzziel in der Deckung eines Assistenzbedarfs beim Fahrer liegt. Dieser Assistenzbedarf kann darin bestehen, in gefährlichen Situationen unterstützt zu werden, oder darin, die Leistungsgrenzen der menschlichen Wahrnehmung zu überwinden, wie es z. B. bei den Sichtverbesserungssystemen der Fall ist. Die Erreichung dieses Assistenzziels erfolgt mittels einer Assistenzfunktion, deren Umsetzung eine entsprechende Sensorik und Aktorik erfordert. Dabei kann eine Assistenzfunktion je nach Konzept mit unterschiedlicher Sensorik und Aktorik realisiert werden; als Beispiel seien Kollisionswarnsysteme genannt, bei denen je nach Hersteller Lidar-, Radar- und/oder Videosensorik zum Einsatz kommt. Assistenzbedarf (der Fahrer hat nur eine begrenzte Reaktionsfähigkeit und ist u. U. unaufmerksam) und Assistenzziel (rechtzeitige Warnung vor einer drohenden Kollision) sowie Funktionsziel (Erkennung von Hindernissen, bei denen die Gefahr einer Kollision besteht) sind dabei gleich und unabhängig vom gewählten Sensorkonzept.

Das vorliegende Handbuch Fahrerassistenzsysteme liefert eine umfassende Darstellung sowohl der Sensorik und Aktorik, die in heutigen Systemen verwendet werden, als auch der Funktionen, die mit diesen Systemen umgesetzt werden. Alle wesentlichen zum Zeitpunkt des Verfassens der Beiträge auf dem Markt erhältlichen Systeme sind in diesem Buch vertreten, ebenso wie einige Weiterentwicklungen, die sich noch im Forschungs- bzw. Entwicklungsstadium befinden. Sehr einfache Fahrerassistenzsysteme wie z. B. die automatische Scheibenwischersteuerung oder Lichtautomatik wurden aus Umfangsgründen nicht berücksichtigt, ebenso wie Komfortfunktionen, die keinen direkten Bezug zur Fahraufgabe haben, wie beispielsweise die automatische Klimaregelung.

Ausgangspunkt und Zentrum der Betrachtungen ist der Fahrer, der durch die Assistenzsysteme unterstützt werden soll. In **Teil A: Grundlagen der Fahrerassistenzsystem-Entwicklung** wird daher die Leistungsfähigkeit des Menschen und sein Verhalten bei der Fahrzeugführung beschrieben und dargelegt, welche Auswirkungen auf die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen sich daraus ergeben. Weitere Grundlagen, die im ersten Teil behandelt werden, sind Entwurf, Test und Bewertung der Systeme sowie ihre Einbindung in die Gesamtfahrzeugarchitektur.

Teil B und **C** des Buches behandeln **Sensorik und Aktorik für Fahrerassistenzsysteme**. Teil B beinhaltet dabei auch die Fusion der Daten

umfelderfassender Sensoren und die Herausforderungen, die sich auf dem Gebiet des maschinellen Sehens stellen.

Aufbauend auf Teil A beschäftigt sich **Teil D: Mensch-Maschine-Schnittstelle für Fahrerassistenzsysteme** mit den Anforderungen an eine nutzergerechte Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle sowie der Anzeigetechnologien, die dabei zum Einsatz kommen.

Die **Teile E** und **F**: **Fahrerassistenz auf Stabilisierungebene** bzw. **Fahrerassistenz auf Bahnführungs- und Navigationsebene** enthalten detaillierte Darstellung von Systemen, wie sie derzeit im Pkw- und Lkw-Bereich sowie bei Motorrädern zum Einsatz kommen. Diese beiden Teile bilden damit das Kernstück des vorliegenden Handbuchs.

Der **Teil G: Zukunft der Fahrerassistenzsysteme** schildert aktuelle Herausforderungen, denen sich Forschung und Entwicklung im Bereich Fahrerassistenzsysteme stellen müssen und wagt mit einem abschließenden „Quo vadis, FAS?“ einen Blick auf die zukünftigen Entwicklungen.

Wir wünschen allen Lesern viel Freude mit diesem Handbuch und hoffen, dass es sich für all jene als nützlich erweisen wird, die es als Nachschlagewerk nutzen oder sich mit seiner Hilfe in das spannende Thema der Fahrerassistenzsysteme einarbeiten wollen. Anregungen, Verbesserungsvorschläge und konstruktive Kritik im Allgemeinen zu dieser ersten Auflage sind uns sehr willkommen und erreichen uns unter der E-Mail-Adresse: fas-buch@fzd.tu-darmstadt.de.

Darmstadt, im Mai 2009

Prof. Dr. rer. nat. *Hermann Winner*
Dipl.-Ing. *Stephan Hakuli*
Dipl.-Wirtsch.-Ing. *Gabriele Wolf*

A

Grundlagen
der Fahrerassistenzsystementwicklung

1 Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung 4

2 Fahrerverhaltensmodelle 15

3 Fahrerassistenz und Verkehrssicherheit 24

4 Nutzergerechte Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion von Fahrerassistenzsystemen 33

5 Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen 43

6 Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen 55

7 EVITA – Das Prüfverfahren zur Beurteilung von Antikollisionssystemen 69

8 Bewertung von Fahrerassistenzsystemen mittels der Vehicle in the Loop-Simulation 76

9 Einflüsse von Fahrerassistenzsystemen auf die Systemarchitektur im Kraftfahrzeug 84

A

1 Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung

Bettina Abendroth, Ralph Bruder

Die Arbeitsaufgabe Kraftfahrzeugführen zählt zu den vorwiegend informatorischen Tätigkeiten mit dem Arbeitsinhalt, Informationen in Reaktionen umzusetzen. Der Fahrer führt hierbei in der Regel eine Steuerungstätigkeit mit kontinuierlicher Informationsverarbeitung aus.

Dementsprechend sind für die Fahrzeugführung vor allem der Prozess der Informationsverarbeitung sowie mit diesem in Wechselwirkung stehende Faktoren der individuellen Charakteristik des Fahrers von Bedeutung.

Zur Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umgebung dient das im Folgenden dargestellte einfache Systemmodell (vgl. [1]). Dieses besteht aus den Elementen Fahrer und Fahrzeug. Die Eingangsgröße Fahrzeugführungsaufgabe, die auch von den Umgebungsfaktoren beeinflusst wird, wirkt auf diese zwei Systemelemente. Darüber hinaus können Störgrößen wie z. B. Ablenkungen durch den Beifahrer auftreten. Die Ausgangsgröße aus diesem System kann durch die Systemleistungen Mobilität, Sicherheit und Komfort beschrieben werden.

1.1 Menschlicher Informationsverarbeitungsprozess

Zur Erklärung der menschlichen Informationsverarbeitung gibt es eine Vielzahl von Modellen, diese spezifizieren die allgemeine Annahme, dass das in einem Rezeptor eintreffende Signal (Stimulus) in eine kognitive Repräsentation und in eine Reaktion des Menschen (Response) umgesetzt wird. Zu den bekanntesten Modellen im Ingenieurbereich zählen die sequenziellen sowie die Ressourcenmodelle. Sequenzielle Modelle unterstellen, dass die Transformation von Stimulus in Response streng sequenziell abläuft, d. h. die nächste Stufe kann erst durch-

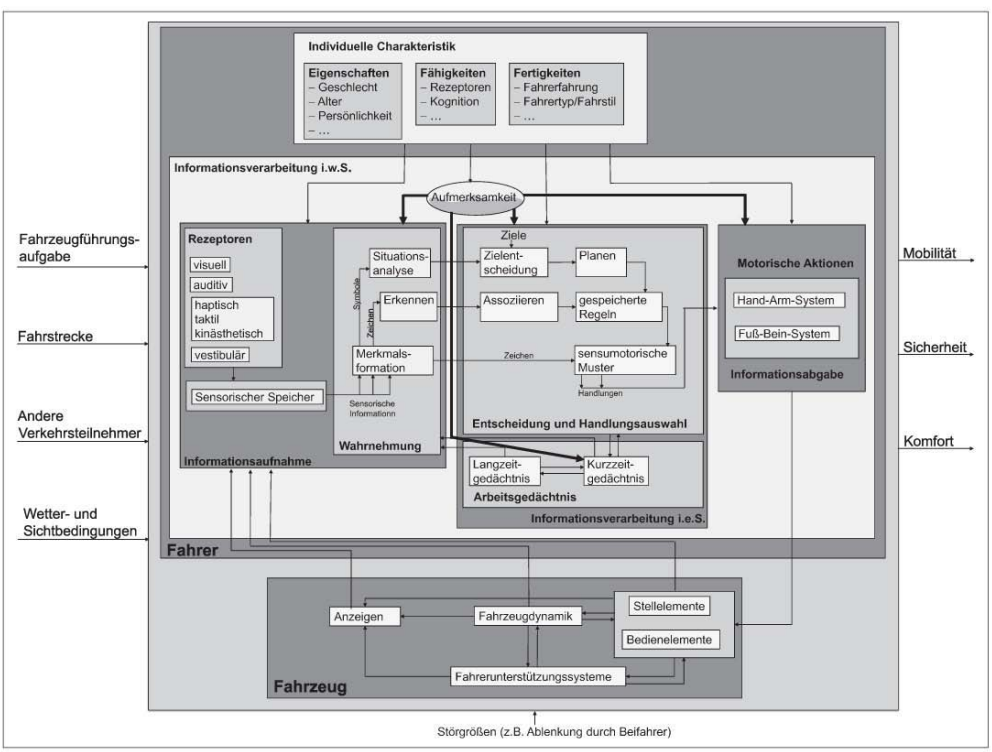


Bild 1-1: Systemmodell Fahrer-Fahrzeug-Umgebung (vgl. [1])

laufen werden, wenn die vorige abgeschlossen ist. Ressourcenmodelle stützen sich auf die Annahme, dass die Kapazität, die für verschiedene Aktivitäten zur Verfügung steht, beschränkt ist und zwischen allen gleichzeitig ausgeführten Aufgaben aufgeteilt werden muss. Die Theorie der multiplen Ressourcen erweitert diese Sichtweise; gemäß dieser hängt das Ausmaß an Interferenz zweier Aufgaben davon ab, ob diese die gleichen Ressourcen beanspruchen [2]. Frei von Interferenz wäre demnach die gleichzeitige Verarbeitung visueller, räumlicher Bildinformationen (z. B. Zielführungsanzeige) und auditiver, verbaler Informationen (Telefongespräch, Nachrichten im Radio), da diese unterschiedliche Sinneskanäle und unterschiedliche Bereiche im Arbeitsgedächtnis nutzen. Experimentelle Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass diese Freiheit von Interferenz nicht uneingeschränkt gilt.

Die menschliche Informationsverarbeitung wird hier anhand eines kombinierten Stufen- und Ressourcenmodells erklärt (siehe **Bild 1-1**). Dieses basiert auf den Verarbeitungsstufen Informationsaufnahme (Perzeption), Informationsverarbeitung i. e. S. (Kognition) und Informationsabgabe (Motorik) [3]. Darüber hinaus wird berücksichtigt, dass die zur Verfügung stehende Ressourcenkapazität beschränkt ist.

Die Effizienz der drei Verarbeitungsstufen des Informationsverarbeitungsprozesses wird durch die zur Verfügung stehenden Verarbeitungsressourcen beeinflusst und benötigt die Zuwendung von Aufmerksamkeit. Diese bewirkt die gezielte Selektion von Informationen, die zu Inhalten der bewussten Verarbeitung werden sollen. Denn das ständige Überangebot an Informationen übersteigt die menschliche Verarbeitungskapazität, sodass der Mensch bei Weitem nicht alles bewusst wahrnehmen kann, was ihn auf der Ebene der Sinnesrezeptoren erreicht.

Der Mensch kann seine gesamte Aufmerksamkeit unterschiedlich auf die drei Stufen des Informationsverarbeitungsprozesses verteilen, um relevante Informationsquellen auszuwählen und diese Informationen weiterzuverarbeiten. Für jede Arbeitstätigkeit kann eine günstige Aufmerksamkeitsverteilung vom Menschen erlernt werden, im Extremfall kann eine schlechte Aufmerksamkeitsverteilung menschliche Fehlhandlungen verursachen.

Auf theoretischer Ebene können verschiedene Formen der Aufmerksamkeit in den Dimensionen Selektivität und Intensität unterschieden werden. Mit der selektiven Aufmerksamkeitszuwendung wird die Tatsache beschrieben, dass der Mensch sich zwischen verschiedenen, miteinander konkurrierenden Informationsquellen entscheiden muss. Im Rahmen der geteilten Aufmerksamkeit muss der Mensch verschiedene Reize simultan wahrnehmen, während er sich bei einem Aufmerksamkeitswechsel von einem Reiz abwendet, um sich anschließend einem anderen zuzuwenden. Die Intensität der Aufmerksamkeit betrifft das Aktivierungsniveau, hierbei sind die herabgesetzte Vigilanz (niedriger Anteil relevanter Stimuli) und die Daueraufmerksamkeit (hoher Anteil relevanter Stimuli) von Bedeutung.

1.1.1 Informationsaufnahme

Der Informationsaufnahme werden alle Prozesse zugeordnet, die das Entdecken und Erkennen von Informationen betreffen. Dabei wird der Vorgang der internen Repräsentation der Umwelt als Wahrnehmung bezeichnet. Dieses innere Abbild der Umwelt wird beeinflusst von der aktuellen Situation, in der sich der Mensch befindet, und den Erfahrungen, über die dieser verfügt. Die Informationsaufnahme erfolgt über die Sinnesorgane. Der Mensch kann eine Vielzahl gleichzeitig übermittelter Informationen parallel über alle Sinneskanäle aufnehmen, allerdings kann die gleichzeitige Verarbeitung verschiedener Informationen die Leistung verschlechtern. Die spezifischen Leistungsbereiche der Sinnesorgane beeinflussen Quantität und Qualität der aufgenommenen Informationen und somit auch alle folgenden Informationsverarbeitungsschritte. Dem menschlichen Wahrnehmungssystem werden neun sensorische Modalitäten zugeordnet. Für die Fahrzeugführung sind jedoch vor allem visuelle, akustische, haptische und vestibuläre Wahrnehmungen von Bedeutung. Darüber hinaus verfügt der Mensch über Rezeptoren zur Wahrnehmung von Geruch, Geschmack, Temperatur und Schmerz. Zusätzlich wird der sensorische Speicher (auch Ultrakurzzeitgedächtnis genannt) dem Bereich der Informationsaufnahme zugeordnet. Im sensorischen Speicher werden ausschließlich physikalisch kodierte Informationen gespeichert. Visuelle Informationen werden im ikonischen, akustische im echoischen Speicher für einen Zeitraum zwischen 0,25 und 2 Sekunden abgelegt [3].

Bei der visuellen Informationsaufnahme hat das Auge folgende drei Grundaufgaben: Adaptation (Anpassung der Empfindlichkeit des Auges an die jeweils herrschende Leuchtdichte), Akkomodation (Einstellung unterschiedlicher Sehentfernungen) und Fixation (Ausrichtung der Augen auf den Sehgegenstand, sodass die beiden Sehachsen konvergent sind). Das Auge dient der Farb-, Objekt- und Bewegungswahrnehmung sowie der Wahrnehmung von räumlicher Tiefe und Größe.

Das Ohr erfüllt bei der Aufnahme auditiver Informationen drei Grundfunktionen: Adaptation (Anstieg der Hörschwelle, der zur Differenzierung des Hörvorgangs erforderlich ist), auditorische Mustererkennung (notwendig für Sprach- und Geräuschidentifizierung) und akustische Raumorientierung, die durch binaurales (beidohriges) Hören realisiert wird.

Bei haptischer Informationsaufnahme werden der taktile und/oder der kinästhetische Wahrnehmungskanal genutzt. Über das taktile Wahrnehmungssystem werden Verformungen der Haut wahrgenommen. Rezeptoren (Vater-Pacinsche Lamellen und Meißnersche Tastkörperchen) vermitteln in und unter der Haut Druck-, Berührungs- und Vibrationsempfinden. Das kinästhetische Wahrnehmungssystem nimmt die Dehnung von Muskeln und die Bewegung der Gelenke wahr. Verschiedene Arten von Rezeptoren, die sich an den Muskelspindeln, im Bereich der Gelenke und der Bänder befinden, ermöglichen die Empfindung von Körperbewegungen und von Stellungen der Körperteile zueinander.

Die Orientierung im Raum wird dem Menschen über das vestibuläre Wahrnehmungssystem ermöglicht. Als Rezeptor wird der sich im Innenohr befindende Vestibularapparat genutzt. Dieser hat darüber hinaus die Aufgaben, Informationen zur Erhaltung des Gleichgewichts und die Auslösung der Stellreflexe zur Normalhaltung des Kopfes und der Augen zu geben. Beim Autofahren trägt der vestibuläre Sinneskanal zur Wahrnehmung von Geschwindigkeit und Beschleunigung des eigenen Fahrzeugs bei.

Die meisten verkehrsrelevanten Informationen werden beim Autofahren visuell aufgenommen (ca. 80–90 %). Grundlage für richtige Handlungsentscheidungen des Fahrers ist eine möglichst vollständige interne Repräsentation des relevanten Verkehrsraums. Beim Fahren mit hoher Geschwindigkeit ist es außerordentlich wichtig, die Informationen zur Führung des Fahrzeugs schon aus großer Entfernung aufzunehmen, sodass ausreichend Zeit bleibt, um die Bewegungen des Fahrzeugs genau an diese Informationen anzupassen. Dies zeigt die Wichtigkeit des visuellen Systems des Fahrers bei der Fahrzeugführungsaufgabe, da das Auge das einzige weitreichende Rezeptorsystem des Menschen ist, welches gezielt ausrichtbar ist [4].

Bei Aufgaben, die menschliches Verhalten im Verkehr umfassen, wird die Informationsaufnahme durch die Grenzen der Augenbewegungen stark dominiert. Der Bereich, aus dem der Fahrer Informationen visuell aufnehmen kann, wird durch das Gesichts-, das Blick- und das Umblickfeld bestimmt. In Abhängigkeit vom Abbildungsort des Objekts auf der Netzhaut wird foveales Sehen und peripheres Sehen unterschieden: Beim fovealen Sehen wird das Objekt in der Netzhautgrube (Fovea) abgebildet, nur in diesem Bereich bis zu einem Öffnungswinkel von 2° können Objekte scharf gesehen werden. Je entfernter das Bild von der Fovea ist, desto unschärfer erscheint ein Gegenstand. Im peripheren Sehbereich können Bewegungen und Helligkeitsänderungen wahrgenommen werden. In der Literatur sind unterschiedliche Ansichten zur Rolle und zum Beitrag des fovealen und des peripheren Sehens zur Informationsaufnahme beim Kraftfahrzeugführen zu finden. [4] nehmen an, dass die foveale Informationsaufnahme beim Fahrzeugführen unter hohen Belastungen, d. h. bei hoher Informationsdichte und somit hohen Anforderungen an die Informationsverarbeitung, starkes Gewicht hat.

Die Größe des nutzbaren Sehfeldes ist bei guten und schlechten Kraftfahrern unterschiedlich. Während gute Fahrer ein nutzbares Sehfeld von 9–10° besitzen, umfasst es bei schlechten Autofahrern nur 6–7° [5]. Unter dem nutzbaren Sehfeld wird eine variable räumliche Ausdehnung um die Netzhautgrube herum verstanden, die den Bereich beschreibt, innerhalb dessen eine Person die für eine bestimmte definierte Aufgabe erforderlichen Informationen entdecken kann.

Die Güte der visuellen Informationsaufnahme des Menschen wird durch die Art des Signals und die Darbietungshäufigkeit beeinflusst. So unterscheidet [6] kritische, neutrale und nicht-kritische Signale sowie nichtkritische und kritische Zusatzsignale. Bezüglich der Häufigkeit der Informationsdarbietung haben die Untersuchungen mehrerer Autoren (eine Übersicht gibt [6]) ergeben, dass die Beobachtungsleistung um so besser ist, je mehr reaktionsfordernde Signale pro Zeiteinheit dargeboten werden. Diese Regel gilt bis zu einer optimalen Signalhäufigkeit von ca. 120 bis 300 Signalen pro Stunde. Bei einer wesentlichen Überschreitung dieser Signalhäufigkeit gerät der Beobachter in eine Überforderungssituation mit dem Ergebnis, dass immer mehr Signale unbeantwortet bleiben. [7] gehen mit ihrer „Theory of Pathway Inhibition" davon aus, dass sich gleichartige Reize behindern und somit durch heterogene Reize eine bessere Aufmerksamkeitsleistung erreicht wird.

1.1.2 Informationsverarbeitung

Signale aus der Umgebung (z. B. Charakteristik der Fahrstrecke, andere Verkehrsteilnehmer, Wetter- und Sichtbedingungen) sowie vom Fahrzeug

(z. B. Anzeigen, Stell- und Bedienelemente und die Fahrzeugdynamik) werden von den menschlichen Rezeptoren aufgenommen, aufbereitet und auf der Stufe der Informationsverarbeitung i. e. S. (Kognition) weiterverarbeitet. Hier wird entschieden, ob eine Information zu einer Handlung führt (aktiver Fall) oder erduldet wird (passiver Fall). Diese Entscheidung wird maßgeblich von der individuellen Charakteristik des Fahrers beeinflusst. Die Informationsverarbeitung i. e. S. umfasst die Stufen Wahrnehmung und Entscheidung/Handlungsauswahl. Diese Stufen können durch die drei aufeinander aufbauenden Verhaltensebenen, die gemäß [8] als fertigkeitsbasiert, regelbasiert und wissensbasiert bezeichnet werden, erklärt werden. Auf welcher Verhaltensebene die Informationsverarbeitung abläuft, ist von der Art der auszuführenden Aufgabe sowie der individuellen Charakteristik des Fahrers, insbesondere seinen Erfahrungen im Bereich der gegebenen Anforderungen, abhängig.

Der fertigkeitsbasierten Ebene werden sensumotorische Handlungen, die ohne bewusste Regulation als automatisierte, gleichmäßige und hochintegrierte Verhaltensmuster auftreten, zugeordnet. Dies ermöglicht eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit und somit das rasche und flexible Reagieren auf situative Veränderungen. Hier handelt es sich um automatische Prozesse, die kaum Aufmerksamkeit beanspruchen. Das regelbasierte Verhalten läuft auf kognitiv anspruchsvolleren Ebenen ab und wird durch einfache Entscheidungsvorgänge auf Basis von gespeicherten Regeln bestimmt. Diese Regeln werden durch empirische Erfahrungen, kommunizierte oder gelesene Verhaltensanweisungen gesammelt. Es findet eine Assoziation von Merkmalen der gespeicherten Regeln mit den Umgebungsmerkmalen statt. In unbekannten, für den Menschen neuen Situationen, für die keine Regeln vorliegen, läuft das Verhalten auf der wissensbasierten Ebene ab. Hier wird das Ziel aufgrund einer Situationsanalyse und persönlicher Präferenzen festgelegt. Es werden Alternativpläne entwickelt und der im Hinblick auf das festgelegte Ziel effektivste Plan ausgewählt. Im Gegensatz zu den auf der fertigkeitsbasierten Ebene ablaufenden Prozessen werden die den regelbasierten und wissensbasierten Ebenen zugeordneten Prozesse als kontrolliert bezeichnet und erfordern mehr Aufmerksamkeit.

Bei der kognitiven Verarbeitung von Informationen spielt das Gedächtnis eine zentrale Rolle. Mit dessen Hilfe werden die Sinneseindrücke mit erlernten und gespeicherten Strukturen des Denkens und Urteilens verglichen. Nach dem klassischen Drei-Speicher-Modell besteht das Gedächtnis aus sensorischem Speicher (Ultrakurzzeitspeicher), Kurzzeitspeicher und Langzeitspeicher. Im Kurz- und Langzeitgedächtnis werden die Informationen aktiv bearbeitet. Während eines kontinuierlichen Prozesses werden die abgespeicherten Informationen aus Lang- und Kurzzeitgedächtnis abgerufen und mit den sensorisch aufgenommenen Merkmalsträgern verglichen.

Die Unfallgefahr eines Autofahrers wird sowohl von der individuellen Akzeptanz als auch von Fehlwahrnehmungen bezüglich Risiken im Straßenverkehr beeinflusst. Ein wesentlicher Aspekt des Entscheidungsvorgangs innerhalb des Informationsverarbeitungsprozesses ist die Tatsache, dass die Handlung ausgewählt wird, die unter Variation der äußeren Umstände den größten Nutzen unter Beachtung des damit verbundenen Risikos verspricht. Der Begriff Risiko wird unterschiedlich definiert. Oftmals wird er als Wahrscheinlichkeit, dass ein nicht gewünschtes Ereignis eintritt, interpretiert. So definieren z. B. [9] Risiko als das Verhältnis zwischen Größen, die negative Konsequenzen von Ereignissen beschreiben, und Größen, die die Wahrscheinlichkeit eines Eintreffens der Bedingungen charakterisieren, unter denen diese Konsequenzen möglich sind. Diese Sichtweise schließt jedoch das Risikobewusstsein nicht mit ein. [10] sieht das Risiko deshalb als eine multidimensionale Charakterisierung einer negativen Erwartung an, die sich aus einem probabilistischen Entscheidungsprozess ergibt.

Zur Erklärung der Risikowahrnehmung von Autofahrern wurden zahlreiche Modelle entwickelt. Zu den bekanntesten zählen das ‚Zero Risk'-Modell von [11] und das Modell der ‚Risikohomöostase' von [12]. Gemäß dem ‚Zero Risk'-Modell handeln Menschen so, dass ihr subjektives Risiko null beträgt; dieses Modell basiert auf der individuellen Motivation, die das Fahrerverhalten beeinflusst, und der Adaptation an das im Straßenverkehr wahrgenommene Risiko. Demgegenüber geht die Theorie der ‚Risikohomöostase' davon aus, dass der Mensch bei einer Reduzierung des objektiven Risikos (z. B. durch technische Maßnahmen) sein Verhalten soweit in Richtung „gefährlicher" verändert, dass die subjektive Schätzung des Risikos wieder die gleiche Distanz zum persönlich akzeptierten Risiko erhält wie vor der Einführung der Maßnahme [12].

Das ‚Modell der subjektiven und objektiven Sicherheit' stellt der subjektiv erlebten Sicherheit solche Formen der Sicherheit gegenüber, die physikalisch messbar sind [13]. Das Gefahren-Vermeidungs-Modell (Threat-Avoidance Model) von [14] geht davon aus, dass die Handlungen eines Fahrers bei Wahrnehmung eines potenziell gefährlichen Ereignisses vorrangig durch Abwägung des Nut-

zens und der Kosten aller Alternativen ausgewählt werden.

Als Hauptkomponenten bei der Risikowahrnehmung sehen [9] einerseits Informationen über potenzielle Gefahren in der Verkehrsumgebung und andererseits Informationen über die Fähigkeiten des Systems Fahrer-Fahrzeug an, die verhindern, dass das Gefahrenpotenzial zu einem Unfall führt.

1.1.3 Informationsabgabe

In der dritten Stufe des Informationsverarbeitungsprozesses werden die auf der Stufe der Informationsverarbeitung i. e. S. getroffenen Entscheidungen in Handlungen umgesetzt. Diese Handlungen umfassen beim Fahrzeugführen motorische Bewegungen des Hand-Arm-Systems sowie des Fuß-Bein-Systems. Die physische Belastung im Sinne einer arbeitsphysiologisch zu leistenden Arbeit ist im Vergleich zu den sich aus der Informationsaufnahme und -verarbeitung ergebenden Belastungen gering und wird durch technische Unterstützungssysteme im Fahrzeug (z. B. Servolenkung) immer weiter reduziert.

1.2 Fahrercharakteristik und die Grenzen menschlicher Leistungsfähigkeit

Die menschliche Leistung ist allgemein charakterisiert durch die Arbeitsergebnisse und die Beanspruchung des arbeitsausführenden Individuums. Sowohl die Arbeitsergebnisse als auch die Beanspruchungen unterliegen inter- und intraindividuellen Streuungen: Nicht alle Personen erfüllen dieselbe Aufgabe gleich gut, aber auch eine einzelne Person kann Leistungsvariabilitäten aufweisen, wenn die Leistungserfüllung derselben Aufgabe zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessen wird. Zurückzuführen sind diese Variabilitäten auf die individuelle Charakteristik des Menschen und somit auf die unterschiedlichen Leistungsvoraussetzungen. Im Folgenden werden für das Autofahren relevante menschliche Leistungsvoraussetzungen und ihre Auswirkungen auf die Fahrleistung und -sicherheit erläutert. Es erfolgt eine Systematisierung in Eigenschaften, Fähigkeiten und Fertigkeiten.

Eigenschaften
Als Eigenschaften werden intraindividuell weitgehend zeitunabhängige (oder sich nur innerhalb sehr großer Zeiträume ändernde) Einflussgrößen verstanden. Als wichtigste für das Autofahren relevante Eigenschaften werden häufig Geschlecht, Alter und Persönlichkeitsmerkmale genannt.

Während in einigen Untersuchungen geschlechtsspezifische Unterschiede im Fahrerverhalten festgestellt wurden, konnten in anderen Untersuchungen keine Unterschiede im Hinblick auf das Risikoverhalten sowie das Geschwindigkeitsverhalten bestätigt werden. Außerdem sind Unterschiede in der Wahrnehmung des Unfallrisikos bei Männern und Frauen festzustellen: Männer schätzen ihr Fahrkönnen besser ein als Frauen, dabei neigen Frauen eher zu einer Unterschätzung ihrer Leistungsfähigkeit, während Männer eher zu einer Überschätzung tendieren. Außerdem beurteilten männliche Fahrer bestimmte Verhaltensweisen als weniger gefährlich und weniger unfallträchtig als weibliche.

Die Fähigkeiten des Menschen, sich sensorisch zu orientieren, aufgenommene Informationen zu verarbeiten und motorische Handlungen auszuführen, wandeln sich im Zuge des Alterungsprozesses, innerhalb dessen die menschlichen Organe einer Veränderung unterliegen. Die sensumotorische Leistungsfähigkeit des Menschen hat starken Einfluss auf den Informationsverarbeitungsprozess des Fahrers und somit auf die Sicherheit des Systems Fahrer-Fahrzeug-Umgebung. Jedoch können aufgrund der bei älteren Fahrern in der Regel vorhandenen großen Fahrerfahrung die zunehmenden funktionalen Defizite zumindest teilweise kompensiert werden. Für die Definition des Begriffs „Ältere“ existieren verschiedene Ansätze. Oftmals orientiert man sich am kalendarischen bzw. chronologischen Alter; demnach werden Menschen ab dem 60. oder 65. Lebensjahr zu den Älteren gezählt, obwohl die mit dem Alterungsprozess verbundenen funktionalen Veränderungen mit erheblichen interindividuellen Varianzen behaftet sind.

Auch verschiedene Persönlichkeitsmerkmale des Fahrers beeinflussen sein Verhalten. So wurden Zusammenhänge zwischen der Risikobereitschaft von Fahrern und der von ihnen gefahrenen Geschwindigkeit sowie der Kraftschlussnutzung festgestellt. Fahrer, die emotional instabil, impulsiv und nicht teamfähig sind, unterliegen einem höheren Unfallrisiko als Menschen, die anpassungsfähig und emotional stabil sind. Außerdem werden die selektive Aufmerksamkeit, der Wahrnehmungsstil und die Reaktionszeit als individuelle Merkmale genannt, die als Indikatoren für die Unfallbeteiligung gelten.

Fähigkeiten
Als Fähigkeiten werden die verfügbaren intraindividuell zeitabhängig kurz- bzw. langfristigen

Änderungen verstanden; sie betreffen physiologische Organ- oder so genannte Grundfunktionen des Menschen.

Durch die als Intelligenz bezeichneten geistigen Fähigkeiten werden die Handlungen eines Fahrers insbesondere auf der wissensbasierten Ebene beeinflusst. Der Begriff Intelligenz ist in der Literatur umstritten und wird dementsprechend auch nicht einheitlich definiert. Nach einer weit gefassten Definition wird unter Intelligenz die hierarchisch strukturierte Gesamtheit jener allgemeinen geistigen Fähigkeiten verstanden, die das Niveau und die Qualität der Denkprozesse einer Persönlichkeit bestimmen. Mit Hilfe dieser Fähigkeiten können die für das Handeln wesentlichen Eigenschaften einer Problemsituation in ihren Zusammenhängen erkannt werden, so dass die Situation entsprechend bestimmter Zielvorstellungen verändert werden kann.

Aber auch die kognitiven und sensumotorischen Fähigkeiten des Menschen sowie das Reaktionsvermögen beeinflussen das Autofahren indirekt über die Auswirkungen dieser Merkmale auf den Informationsverarbeitungsprozess.

Mit zunehmendem Alter verschlechtern sich die Fähigkeiten der Rezeptoren, was insgesamt zu Einschränkungen im Bereich der Informationsaufnahme führt.

So verändern sich die Augenbestandteile aufgrund eines Flüssigkeitsentzugs im Gewebe durch den Alterungsprozess. Die sich daraus ergebenden Wirkungen auf die visuellen Fähigkeiten sind in **Tabelle 1-1** zusammengefasst.

Die mit dem Alter fortschreitende Einschränkung des Gesichtsfeldes verschärft die Problematik des Bewegungssehens beim Autofahren, da die Bewegung relevanter Objekte zunächst im peripheren Gesichtsfeld beobachtbar ist.

Altersveränderungen des Hörvermögens bestehen in einer Abnahme der Hörschwelle, vor allem im Bereich hoher Frequenzen. Schwierigkeiten bei der Frequenz- und auch der Intensitätsdiskrimination von Tönen sowie bei der Erkennung komplexer Geräusche wie z. B. Sprache unter schwierigen Wahrnehmungsbedingungen (z. B. Störgeräusche, Verzerrungen) und teilweise erschwertes Richtungshören sind weitere Altersveränderungen des Hörvermögens.

Mit zunehmendem Alter nimmt auch die taktile Wahrnehmungsempfindlichkeit ab.

Der Gleichgewichtssinn ist bei 20- bis 30-Jährigen am besten ausgebildet und nimmt ab dem 40. Lebensjahr stark ab, sodass sich dieser im Alter von 60 bis 70 Jahren auf die Hälfte reduziert hat.

Mit zunehmendem Alter arbeitet der sensorische Speicher weniger effizient. Akustische Signale weisen im echoischen Speicher eine höhere Zerfallsgeschwindigkeit auf, während visuelle Signale länger im ikonischen Speicher verbleiben. Dies führt bei der Bereitstellung verkehrsrelevanter Informationen dazu, dass akustische Informationen nur in zeitlich verkürztem Umfang zur Bearbeitung zur Verfügung stehen und visuelle Reize wegen der Blockierung des ikonischen Speichers nur in beschränktem Umfang aufgenommen werden können.

Tabelle 1-1: Mit dem Alter eintretende Veränderungen des visuellen Systems (↑ Zunahme; ↓ Abnahme)

Wirkung	Ursache bzw. Einflussgrößen
↓ Akkomodationsbreite	↓ Flüssigkeit im Gewebe
↓ Statische Sehschärfe	Beleuchtungsverhältnisse
↓ Dynamische Sehschärfe	↓ Akkomodationsgeschwindigkeit
	↑ Trägheit der Sinneszellen
↑ Blendungsempfindlichkeit	↑ Funktionale Störungen der Netzhaut
	↑ Adaptationszeit
↓ Kontrastsehen	
↑ Erforderliche Leuchtdichte	↑ Eintrübung von Hornhaut, Linse und Glaskörper
↑ Einschränkung des Gesichtsfeldes	

In den einzelnen Bereichen der Aufmerksamkeit gibt es bei älteren Menschen Leistungsreduktionen, diese ergeben in ihrer additiven Wirkung eine insgesamt schlechtere Aufmerksamkeitsleistung. Dies führt dazu, dass Ältere ihre Handlungsentscheidung auf einer relativ kleineren Basis von Umgebungsinformationen treffen müssen als jüngere Verkehrsteilnehmer, da sie nicht über alle potenziell wichtigen Informationen verfügen.

Insgesamt zeigt sich, dass für ältere Fahrer vor allem in komplexen und neuartigen Situationen, die schnelles Handeln erfordern, Schwierigkeiten auftreten können. Zusätzlich erschwerend wirken die Einschränkungen bei der Informationsaufnahme, die zu einer teilweise verzögerten sensorischen Bereitstellung relevanter Informationen führen, womit für ältere Fahrer eine geringere Zeit für die Verarbeitung verkehrsrelevanter Informationen und entsprechender Handlungen bleibt.

Fertigkeiten

Unter Fertigkeiten werden Arbeitsfunktionen des Menschen verstanden, die sowohl durch menschliche Grundfunktionen als auch durch den konkreten Gestaltungszustand der Arbeitsaufgabe und der Arbeitsumgebung bedingt sind. In Zusammenhang mit dem Autofahren haben die Fahrerfahrung und der Fahrstil (Klassifizierung anhand der vom Fahrer gewählten Fahrzeuggrößen) bzw. Fahrertyp (Klassifizierung anhand der beobachteten Verhaltensweisen des Fahrers) eine große Bedeutung.

Die Fahrerfahrung kann unterschiedliche Auswirkungen auf das Unfallrisiko haben. Mit wachsender Fahrerfahrung verbessern sich die Fahrfertigkeiten und das Erkennen sowie die Einschätzung von Risiken. Eine Verbesserung der Fahrfertigkeit ist darauf zurückzuführen, dass mit zunehmender Kilometerzahl die Anzahl erlebter unterschiedlicher Fahrsituationen wächst und dadurch die Ausbildung von Handlungsroutinen ermöglicht wird. Feldversuche haben gezeigt, dass sich unerfahrene Fahrer im Hinblick auf Antizipation, visuelles Suchverhalten und Sicherheitsgrenzen nicht von den erfahrenen Fahrern unterscheiden. Während die Kontrolle über das Fahrzeug mit zunehmender Fahrerfahrung besser wird, führt die Erfahrung in anderen Bereichen zur Ausbildung von Fehlern und schlechten Gewohnheiten, wie z. B. dem Nichtbeachten der Spiegel, spätem Bremsen und dichtem Auffahren. Bei Fertigkeiten, die die Kontrolle über das Fahrzeug widerspiegeln, haben sich Anfänger als schlechter erwiesen als erfahrene Fahrer. Dies zeigt sich durch spätes Beschleunigen, schlechte und inkonsistente Lenkbewegungen und langsame Gangwechsel bei Anfängern. Auch haben die Lenkbewegungen unerfahrener Fahrer eine höhere Frequenz als die erfahrener Fahrer. Das Blickverhalten unerfahrenerer Fahrer wird häufig als ineffizienter bezeichnet, da sie zu häufig Punkte im Nahbereich fixieren. So werden entfernte Unfallgefahren von jungen, unerfahrenen Fahrern im Vergleich zu erfahrenen Fahrern relativ schlecht erkannt, bei der Erkennung naher Gefahren bestehen jedoch keine Unterschiede zwischen diesen beiden Gruppen. Mit zunehmender Erfahrung lernen Fahrer, gefährliche Objekte und Ereignisse anhand bestimmter Teile des Verkehrssystems zu erkennen. Dies entspricht auch der Tatsache, dass sich die visuellen Fixations- und Suchmuster von unerfahrenen und erfahrenen Fahrern unterscheiden. Unterschiedliches Geschwindigkeitsverhalten ergibt sich bei Kurvenfahrten in Abhängigkeit von der Fahrerfahrung. Erfahrene Fahrer fahren schneller in Kurven ein und verzögern in der Kurve stärker als unerfahrene.

Der Fahrstil wird sowohl durch die Fahrerfahrung als auch durch die Persönlichkeit des Fahrers geprägt und kann somit auch den Eigenschaften eines Fahrers zugeordnet werden. Die in der Literatur beschriebenen Fahrstile und Fahrertypen weisen große Übereinstimmungen auf.

Unterschiedliche Formen des Fahrstils wurden festgestellt. So kann dieser bei Führern von Nutzfahrzeugen als „lahm-lasch“, „eckig-abrupt“ oder „zügig-flott“ bezeichnet werden. Bei PKW-Fahrern wurden anhand von Kenngrößen für Geschwindigkeit, Längsbeschleunigung, Abstand zum Vorausfahrenden die Fahrstile „eher langsam und komfortbewusst“, „durchschnittlich mit hohem Sicherheitsbewusstsein“ und „schnell und sportlich“ identifiziert. Auf Basis von Verhaltensbeobachtungen wurden ähnliche Fahrertypen gefunden, die als „unauffällige Durchschnittsfahrer“, „wenig routinierte-unentschlossene Fahrer“, „sportlich-ambitionierte Fahrer“ und „risikofreudig-aggressive Fahrer“ bezeichnet wurden.

1.3 Anforderungen an den Fahrzeugführer im System Fahrer-Fahrzeug-Umgebung

Die Anforderungen an den Fahrer ergeben sich aus der Fahrzeugführungsaufgabe, die von Faktoren aus der Umgebung mitbestimmt werden. Hier steht die Komplexität der vom Fahrer zu bewältigenden Situation im Vordergrund. Diese ergibt sich aus der Charakteristik der Fahrstrecke und dem dynamischen Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer. Wie der Fahrer diese Anforderungen bewältigt, ist

einerseits von seiner individuellen Charakteristik und andererseits von der durch das Fahrzeug angebotenen Fahrerunterstützung (Assistenzsysteme) abhängig. In Abhängigkeit von Belastungshöhe und -dauer treten Engpässe im Informationsverarbeitungsprozess des Fahrers auf, die entsprechend des Kontinuums des Verkehrsverhaltens nach [13] zu einer Abweichung vom so genannten „Normalverhalten" bis hin zu kritischen Verkehrssituationen und auch zu Unfällen führen können. Um diese Engpässe zu identifizieren, werden im Folgenden die Teilaufgaben der Fahrzeugführung und die sich aus diesen ergebenden Anforderungen zusammengestellt.

Teilaufgaben der Fahrzeugführung

Ansätze zur Beschreibung der Fahrzeugführungsaufgabe durch Teilaufgaben existieren auf unterschiedlicher Detaillierungsebene, zum Teil wurden sie für spezielle Erklärungszwecke oder einzelne Aspekte der Fahrzeugführungsaufgabe abgeleitet. Im Folgenden werden nur zwei häufig genannte Klassifizierungen aufgeführt.

Eine Einteilung der Fahreraufgaben nach ihrer Bedeutung für die Erfüllung des Fahrtzwecks wird von [15] vorgeschlagen. Primäre Tätigkeiten umfassen für die Durchführung der Fahrt unbedingt notwendige Tätigkeiten wie z. B. Lenken und Gas Geben und wird maßgeblich durch den Straßenverlauf, andere Verkehrsteilnehmer und die Umgebungsbedingungen bestimmt. Sekundäre Tätigkeiten sind durch die Informationsabgabe an die Umgebung – hierzu gehören beispielsweise Blinken oder Hupen – sowie durch eine Reaktion auf die aktuelle Situation, wie z. B. Einschalten des Scheibenwischers oder Einschalten des Fernlichts, charakterisiert. Tertiäre Handlungen stehen nicht in direktem Zusammenhang mit der eigentlichen Fahrzeugführung, sie dienen eher dem Fahrkomfort und umfassen z. B. die Regelung der Lüftung sowie der Klimaanlage oder die Bedienung des Radios.

Das 3-Ebenen-Modell von [16] beschreibt eine Hierarchie der primären Fahraufgaben auf oberster Ebene mit den Tätigkeiten

- Navigieren (Auswahl der Fahrtroute),
- Bahnführen (Festlegung von Sollspur und Sollgeschwindigkeit) und
- Stabilisieren (Anpassung der Fahrzeugbewegung an die festgelegten Führungsgrößen).

Diese Hierarchie spiegelt auch den zeitlichen Spielraum, der zur Erledigung der jeweiligen Aufgaben zur Verfügung steht, sowie die Fehlertoleranz wider. Während eine verspätete Entscheidung oder ein Fehler auf der Navigationsebene in der Regel zu keiner kritischen Situation führt, können auf der Stabilisierungsebene durchaus kritische Fahrsituationen oder sogar Unfälle entstehen.

Anforderungen aus der Fahrzeugführungsaufgabe

Generell ergeben sich für den Menschen die Anforderungen einer Tätigkeit aus den Arbeitsaufgaben. Unter Berücksichtigung der aufgabenunspezifischen, situativen Arbeitsbedingungen entstehen objektiv beschreibbare Belastungen. Zu diesen situativen Faktoren zählen Dauer und zeitliche Zusammensetzung der Anforderungen einerseits sowie Einflüsse aus der Arbeitsumgebung andererseits.

Um Anforderungen aus der Arbeitsaufgabe zu ermitteln, wurden verschiedene Tätigkeitsanalyseverfahren entwickelt. Zur Analyse der Anforderungen aus der Fahrzeugführungsaufgabe wurde von [17] für den Straßenverkehr eine modifizierte Version des Fragebogens zur Arbeitsanalyse (FAA, [18]) erstellt. Diese modifizierte Version berücksichtigt die Bereiche Informationsverarbeitung und Fahrzeugbedienung, ersterer wird weiter unterteilt in Quellen der Information, Sinnes- und Wahrnehmungsprozesse, Beurteilungsleistungen sowie Denk- und Entscheidungsprozesse. Insgesamt werden 32 Arbeitselemente für den Bereich Informationsverarbeitung und 7 Arbeitselemente für den Bereich der Fahrzeugbedienung angegeben.

Auf Grundlage des von [17] modifizierten FAA sowie anhand des Teils erforderliche kognitive Leistungen des Tätigkeitsbewertungssystem (TBS, [19]) werden die sich aus der Fahrzeugführungsaufgabe ergebenden Anforderungen abgeleitet.

Bei der im Folgenden aufgeführten Liste von Anforderungen umfasst der Bereich Informationsquellen, Sinnes- und Wahrnehmungsprozesse die Orientierungsleistungen im Umgebungsbereich. Dazu werden wahrgenommene Sachverhalte als Signale erfasst und aufbereitet sowie Hypothesen gebildet und geprüft. Signale sind Reize, die unterschieden und identifiziert werden, bei einer bestimmten Ausprägung eine bestimmte Bedeutung für die Arbeitstätigkeit haben und ein spezifisches Handeln als notwendig anzeigen. Die Beurteilungsleistungen werden durch das Ableiten von Diagnosen über Zustände erbracht, um geeignete Maßnahmen zu finden. Dazu werden Reize ausgesondert, verglichen und Signalausprägungen kombiniert. Die Entscheidungs- und Denkanforderungen können einerseits aus diagnostischen Leistungen, die die Ermittlung möglicher Varianten umfassen, und andererseits aus prognostischen Leistungen, die zur Auswahl zweckmäßiger Varianten dienen, bestehen. Die Fahrzeugbedienung geschieht im Rahmen von Verarbeitungsleistungen.

I Informationsquellen, Sinnes- und Wahrnehmungsprozesse

- Optische Anzeigen im Fahrzeug
  z. B. Instrumente (z. B. Geschwindigkeitsanzeige), Stellung von Bedienelementen (z. B. heizbare Heckscheibe), Informationen des Bordcomputers (z. B. Außentemperatur)
- Akustische Informationen
  z. B. Sprachausgabe des Navigationssystems, Martinshorn von Einsatz- und Rettungsfahrzeugen
- Akustische Nebeninformationen
  z. B. Radio, Gespräche mit Beifahrer oder über Telefon
- Andere Verkehrsteilnehmer
  z. B. Fahrzeuge, Fußgänger
- Charakteristik der Fahrstrecke (Streckensituation)
  z. B. Quer- und Längsverlauf der Strecke, Knotenpunkte, Fahrbahnbreite, Anzahl der Fahrstreifen
- Verkehrsschilder
  z. B. Geschwindigkeitsbeschränkungen, Vorfahrtsregelungen, Wegweiser
- Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche, Wetter und Sichtbedingungen
  z. B. Nässe, Verschmutzung, Schnee, Glatteis; Gegenlicht, Regen- bzw. Schneefall, Nebel

B Beurteilungsleistungen

- Längsabstände zu oder zwischen anderen Verkehrsteilnehmern bzw. Objekten
  z. B. zum vorausfahrenden Fahrzeug, zwischen zwei auf der benachbarten Spur fahrenden Fahrzeugen, zu Fußgängern, Radfahrern und Hindernissen auf der Fahrspur
- Querabstände zu oder zwischen anderen Verkehrsteilnehmern bzw. Objekten
  z. B. zu Fahrzeugen auf „gleicher Höhe“, zu Fahrzeugen am Fahrbahnrand
- Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs und anderer Fahrzeuge bzw. Verkehrsteilnehmer
- Antizipation kritischer Verkehrssituationen
  Knappes Einscheren eines Fahrzeugs, Missachtung der Vorfahrtsregelungen durch andere, Kind läuft auf die Straße

E Entscheidungs- und Denkprozesse

- Auswahl geeigneter Handlungen zur Navigation des Fahrzeugs
  z. B. Entscheidung, welche Fahrtroute gewählt wird, Richtungsentscheidung an Knotenpunkten
- Auswahl geeigneter Handlungen zur Bahnführung des Fahrzeugs
  z. B. Entscheidung über zu fahrende Geschwindigkeit und einzuhaltenden Längsabstand, Überholmanöver, Wahl des Fahrstreifens und der Querposition auf diesem

F Fahrzeugbedienung

- Regelung der Fahrzeug-Längsbewegung zur Stabilisierung des Fahrzeugs
  z. B. Gas Geben, Bremsen, Schalten
- Regelung der Fahrzeug-Querbewegung zur Stabilisierung des Fahrzeugs
  z. B. Lenken
- Bedienelemente für weitere Funktionen
  z. B. für Licht, Scheibenwischer, Radio

1.4 Bewertung der Anforderungen aus der Fahrzeugführungsaufgabe im Hinblick auf die menschliche Leistungsfähigkeit

Abschließend werden die oben aufgeführten Anforderungsbereiche im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit des Menschen mit dem Ziel bewertet, sinnvolle Bereiche für eine technische Unterstützung des Fahrers aufzuzeigen.

Informationsquellen, Sinnes- und Wahrnehmungsprozesse

Die Wahrnehmung der für die Erfüllung der Fahrzeugführungsaufgabe relevanten Informationsquellen ist für den Fahrer von großer Wichtigkeit: Er erstellt anhand dieser Informationen ein internes Bild des aktuellen Zustands der Umgebung sowie seines Fahrzeugs, das Grundlage für seine Entscheidungen und Handlungen ist.

Daraus ergibt sich die Anforderung, dass die situationsabhängig relevanten Informationen im Fahrzeug sowie in der Umgebung auch vom Fahrer wahrnehmbar sein müssen. Dies betrifft zum einen die durch den Einsatz von Fahrerunterstützungssystemen neu hinzukommenden Informationen für den Fahrer und zum anderen den Bedarf für Systeme, die versuchen, Informationsdefizite des Fahrers aus der Umgebung zu kompensieren.

Menschliche Wahrnehmungsprozesse werden durch Wahrnehmungsschwellen sowie die notwendige Zuwendung von Aufmerksamkeit begrenzt. Wahrnehmungsschwellen sind zum einen individuell unterschiedlich, so ist z. B. das Alter auch ein maßgeblicher Einflussfaktor, zum anderen sind sie von der Umgebung abhängig. Da Autofahren in sehr unterschiedlichen Umgebungen erfolgt, ist darauf zu achten, dass im Fahrzeug dargebotene Informationen oberhalb der Wahrnehmungsschwel-

len liegen bzw. relevante Informationen aus der Umgebung, falls diese unter bestimmten Umständen nicht wahrgenommen werden können, technisch unterstützt werden (z. B. Night Vision mit Markierung relevanter Informationen wie Fußgänger). Insbesondere die visuellen, akustischen und haptischen Informationen spielen bei der Fahrzeugführung eine große Rolle und sind ihrer Umgebung entsprechend zu gestalten. Die Lichtverhältnisse am Tag und in der Nacht können von großer Helligkeit, starker Blendung bis hin zu starker Dunkelheit variieren, ebenso groß können die Unterschiede in der akustischen Umgebung sein: So gibt es Situationen im Fahrzeug ohne Nebengeräusche über Außengeräusche, die in das Fahrzeug dringen, bis hin zu Unterhaltungen oder lauter Musik im Fahrzeug. Auch haptische Informationen im Fahrzeug sind an mögliche Vibrationen, die vom Fahrzeug oder der Fahrbahn übertragen werden können, anzupassen. Insbesondere bei der Gestaltung von visuellen Informationen im Fahrzeug ist zu beachten, dass der Mensch Objekte nur bei Abbildung in der Netzhautgrube (Fovea) bis zu einem Öffnungswinkel von 2° scharf sehen kann. Somit muss er für die Aufnahme komplexer Informationen im Fahrzeug, die über sehr einfach kodierte Signale hinausgehen, den Blick von der äußeren Fahrzeugumgebung weg bewegen, was mit einer visuellen Ablenkung des Fahrers von der eigentlichen Fahrzeugführungsaufgabe einhergeht.

Ob relevante Informationen vom Fahrer wahrgenommen werden oder nicht, hängt auch maßgeblich davon ab, ob er diesen Informationen Aufmerksamkeit schenkt. Diese Zuwendung von Aufmerksamkeit wird stark von der Gesamtsituation Fahrer-Fahrzeug-Umgebung geprägt. Hier spielen z. B. die Anzahl und Art der miteinander konkurrierenden Informationen im Fahrzeug und in der Umgebung, die mentale und/oder emotionale Beschäftigung des Fahrers mit nicht fahrtrelevanten Belangen sowie persönliche Erfahrungen des Fahrers eine Rolle. Generell hat sich gezeigt, dass Fahrer eine bessere Aufmerksamkeitsleistung in Bezug auf nähere Objekte zeigen und dass Wechsel in der Aufmerksamkeitszuwendung sich rascher und effizienter in „von fern nach nah“ als umgekehrt vollziehen.

Beurteilungsleistungen

Beurteilungsleistungen werden vom Fahrer zur Einschätzung von Abständen, Geschwindigkeiten sowie potenziell kritischer Situationen gefordert.

Da die Beurteilung absoluter Abstände für den Menschen schwierig ist, nutzt der Fahrer unterschiedliche Informationen als Beurteilungsgröße für Längsabstände. Die Blickwinkelgeschwindigkeit, die sich aus der Größe des vorausfahrenden Fahrzeugs, der Geschwindigkeitsdifferenz zu diesem Fahrzeug sowie dem absoluten Abstand zu diesem berechnet, liefert dem Fahrer eine Aussage darüber, wie sich der Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug verändert. In den letzten Jahren wurde die Zeit bis zum Auftreten einer Kollision, Time to Collision (TTC), in die der absolute Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug sowie die Geschwindigkeitsdifferenz eingeht, häufig als für den Fahrer relevante Beurteilungsgröße genannt. Es wird davon ausgegangen, dass die TTC die Aktionen des Fahrers bestimmt [20].

Für die Blickwinkelgeschwindigkeit wird die menschliche Wahrnehmungsschwelle für Bewegungen beim Fahren unter idealen Sichtbedingungen zwischen 3 und $10 \cdot 10^{-4}$ rad/s angegeben. Aber auch die Beobachtungsdauer hat einen Einfluss auf die Wahrnehmungsschwelle von Abständen sowie Geschwindigkeitsdifferenzen bei Folgefahrten. Mit abnehmender Geschwindigkeitsdifferenz und abnehmender Beobachtungsdauer sinkt die Distanz, ab der eine Geschwindigkeitsdifferenz erkannt wird. Generell zeigt sich, dass Fahrer bei geringeren Geschwindigkeiten tendenziell einen größeren als den notwendigen Sicherheitsabstand lassen, bei höheren Geschwindigkeiten diesen allerdings unterschreiten.

Auch akustische Informationen können zur Beurteilung der Entfernung anderer Fahrzeuge beitragen; allerdings kann es hier zu subjektiven Fehleinschätzungen kommen, wenn beispielsweise die Entfernung eines sehr leisen LKWs überschätzt, oder die eines sehr lauten PKWs unterschätzt wird.

Die Antizipation kritischer Situationen wird durch die Erfahrungen des Fahrers mit den jeweiligen potenziell kritischen Situationen geprägt. Je nachdem welche Situationen der Fahrer bereits erlebt und zum Inhalt seines Langzeitgedächtnisses hinzugefügt hat, wird er eine kritische Situation auch anhand für diese Situation relevanter Merkmale als kritisch einstufen und entsprechend reagieren.

Entscheidungs- und Denkprozesse

Bei der Erfüllung der Navigations- sowie der Bahnführungsaufgabe muss der Fahrer auf Basis von Entscheidungs- und Denkprozessen die für die jeweilige Situation geeignete Handlung auswählen. Unter der Voraussetzung, dass dem Menschen ausreichend Zeit für eine aufgrund der äußeren Verkehrssituation notwendigen Entscheidung gegeben ist, gelingt ihm diese besser als einem technischen System. Dies liegt daran, dass dem Fahrer eine vollständigere, wenn auch in einzelnen Aspekten

unpräzisere Repräsentation der Fahrumgebung zugänglich ist und er mit zunehmender Fahrleistung auf immer mehr Erfahrungen mit solchen und ähnlichen Situationen zurückgreifen kann.

Fahrer-Reaktionszeiten liegen zwischen 0,7 s bei erwarteten Situationen wie z. B. einer Annäherungsfahrt, 1,25 s bei unerwarteten, aber gewöhnlichen Situationen (z. B. Bremsen des Vorausfahrenden) und bis zu 1,5 s bei überraschenden Situationen. Je kritischer die Situation, desto schneller erfolgt die Fahrerreaktion. Trägheit und Reaktionsdauer des Menschen variieren in Abhängigkeit von Fahrsituation und Aufmerksamkeit. Der Fahrer reagiert bei Kolonnenfahrt schneller und wählt kleinerer Abstände.

Fahrzeugbedienung

Die Bedienung des Fahrzeugs zur Erfüllung der primären und sekundären Fahraufgaben stellt für den Fahrer gewöhnlich kein Problem dar. Die Regelung der Längs- und Querbewegung läuft für den Fahrer auf der fertigkeitsbasierten Ebene ab, d. h. es handelt sich um automatische Prozesse, die kaum Aufmerksamkeit beanspruchen. Somit kann der Fahrer rasch und flexibel auf situative Veränderungen reagieren. Ebenso verhält es sich mit den sekundären Tätigkeiten, sofern diese häufig vorkommen und vom Fahrer entsprechend gut geübt sind.

Allerdings kann möglicherweise eine Überforderung des Fahrers im Bereich der tertiären Fahraufgaben auftreten, insbesondere dann, wenn Funktionen nur selten genutzt werden, komplexe Menüstrukturen für die Bedienung durchlaufen werden müssen oder der Fahrer mit selten auftretenden Warnhinweisen konfrontiert wird.

Quellenverzeichnis

[1] *Abendroth, B.*: Gestaltungspotentiale für ein PKW-Abstandsregelsystem unter Berücksichtigung verschiedener Fahrertypen. Ergonomia, Stuttgart, 2001

[2] *Wickens, C. D.*: Engeneering Psychology and Human Performance. HarperCollins Publishers Inc., New York, 1992

[3] *Luczak, H.*: Arbeitswissenschaft. Springer, Berlin u. a., 1998

[4] *Cohen, A. S.; Hirsig, R.*: The Role of Foveal Vision in the Process of Information Input. In: Gale, A. G. et al. (Hrsg.): Vision in Vehicles – III. Elsevier, Amsterdam u. a., 1991

[5] *Färber, B.*: Geteilte Aufmerksamkeit: Grundlagen und Anwendung im motorisierten Straßenverkehr. TÜV Rheinland, Köln, 1987

[6] *Schmidtke, H.*: Wachsamkeitsprobleme. In: Schmidtke, H. (Hrsg.): Ergonomie. Hanser, München, Wien, 1993

[7] *Galinsky, T.; Warm, J.; Dember, W.; Weiler, E.; Scerbo, M.*: Sensory Alternation and Vigilance Performance: The Role of Pathway Inhibition. Human Factors 32 (1990) 6, S. 717 – 728

[8] *Rasmussen, J.*: Skills, Rules, and Knowledge: Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. IEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-13 (1983) 3, S. 257 – 266

[9] *Brown, I. D.; Groeger, J. A.*: Risk Perception and Decision Taking during the Transition between Novice and Experienced Driver Status. Ergonomics 31 (1988) 4, S. 585 – 597

[10] *Wagenaar, W. A.*: Risk Taking and Accident Causation. In: Yates, J. F. (Hrsg.): Risk-Taking Behaviour. John Wiley & Sons, Chichester, 1992

[11] *Näätänen, R.; Summala, H.*: Road-user behaviour and traffic accidents. North-Holland Publishing, Amsterdam, Oxford, 1976

[12] *Wilde, G. J. S.*: The Theory of Risk Homeostasis: Implications for Safety and Health. Risk Analysis 2 (1982), S. 209 – 225

[13] *Klebelsberg, D. von*: Verkehrspsychologie. Springer, Berlin u. a., 1982

[14] *Fuller, R.*: A Conceptualization of Driving Behaviour as Threat Avoidance. Ergonomics 27 (1984) 11, S. 1139 – 1155

[15] *Bubb, H.*: Fahrerassistenz primär ein Beitrag zum Komfort oder für die Sicherheit? VDI-Bericht Nr. 1768. VDI, Düsseldorf, 2003, S. 257 – 268

[16] *Donges, E.*: Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. Automobil-Industrie, 1982, S. 183 – 190

[17] *Fastenmeier, W.*: Die Verkehrssituation als Analyseeinheit im Verkehrssystem. In: Fastenmeier (Hrsg.): Autofahrer und Verkehrssituation. Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme. TÜV Rheinland, Köln, 1995

[18] *Frieling, E.; Graf Hoyos, C.*: Fragebogen zur Arbeitsanalyse – FAA. Huber, Bern u. a., 1978

[19] *Hacker, W.; Iwanowa, A.; Richter, P.*: Tätigkeitsbewertungssystem – TBS. Handanweisung. Psychodiagnostisches Zentrum, Berlin, 1983

[20] *Färber, B.*: Abstandswahrnehmung und Bremsverhalten von Kraftfahrern im fließenden Verkehr. Zeitschrift für Verkehrssicherheit 32 (1986) 1, S. 9 – 13

2 Fahrerverhaltensmodelle

Edmund Donges

Die aktive Teilnahme am Straßenverkehr als Fahrer eines Kraftfahrzeugs ist eine komplexe Überwachungs- und Regelungsaufgabe, für deren Gelingen der Fahrer bei heutiger Rechtslage und heutigem Stand der Technik voll verantwortlich ist. Um ihm für diese Aufgabenstellung die bestmöglichen Arbeitsbedingungen zu verschaffen, muss die Auslegung der technisch gestaltbaren Komponenten des Straßenverkehrssystems die Anpassung an die besondere Leistungsfähigkeit des Menschen, aber auch an seine inhärenten Leistungsgrenzen zum Ziel haben. Dies gilt in vollem Umfang auch für Fahrerassistenzsysteme.

Um für eine derartige Anpassung geeignete Grundlagen zu schaffen, begann man in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts [13] damit, Erkenntnisse über das Verhalten von Fahrern während der Fahraufgabe in Form von Fahrermodellen zusammenzufassen. Wegbereiter entsprechender Forschungen im deutschsprachigen Raum war Fiala [8]. Fundierte Übersichten über derartige Ansätze sind beispielsweise in [12] und [11] zu finden. Im Folgenden werden zwei Ansätze aus unterschiedlichen Disziplinen beschrieben, die in den letzten drei Jahrzehnten Beachtung gefunden und eine Reihe von Folgeentwicklungen angestoßen haben.

2.1 Drei-Ebenen-Modell für zielgerichtete Tätigkeiten des Menschen nach Rasmussen, 1983

Zunächst soll an dieser Stelle ein aus der Ingenieurpsychologie stammendes qualitatives, sehr allgemein auf menschliche Arbeit anwendbares Modell für zielgerichtete Tätigkeiten behandelt werden. Es wurde 1983 von Rasmussen vorgestellt [17]. Das Modell unterscheidet drei Kategorien unterschiedlich starker kognitiver Inanspruchnahme des Menschen im Arbeitsprozess, deren Spannweite sich von alltäglichen Routinesituationen über unerwartete Herausforderungen bis hin zu seltenen kritischen Störfällen erstreckt. Diese Drei-Ebenen-Struktur ist in **Bild 2-1** links dargestellt. Zunächst für erfahrenes Personal im ausgelernten Zustand konzipiert,

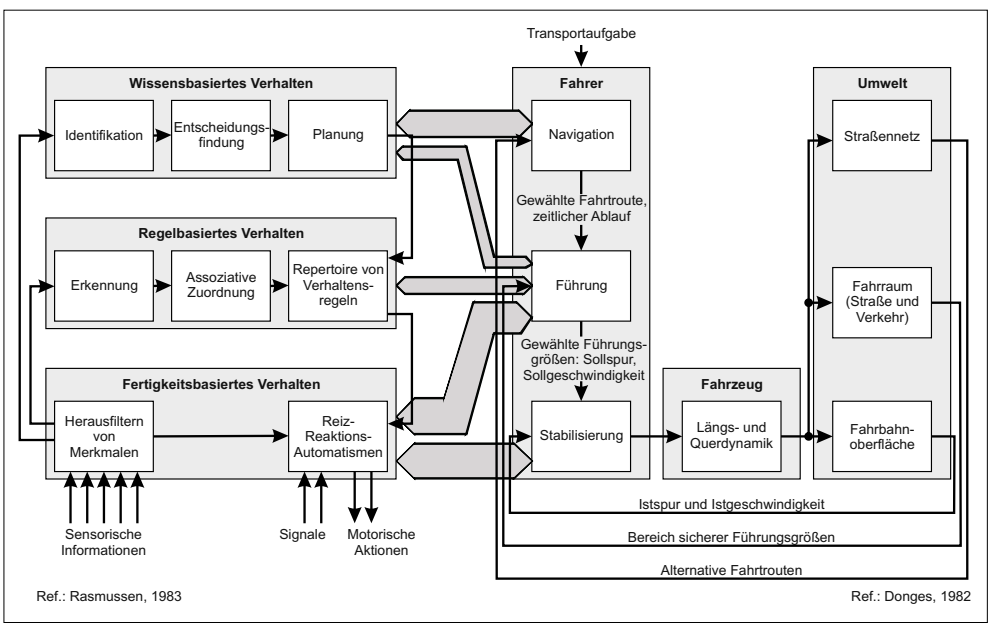


Bild 2-1: Drei-Ebenen-Modell für zielgerichtete Tätigkeiten des Menschen nach Rasmussen und Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe nach Donges

erwies es sich in der Folge auch als für die Beschreibung unterschiedlicher Phasen des menschlichen Lernverhaltens geeignet.

Die Führung von Kraftfahrzeugen im Straßenverkehr gehört – im wahrsten Sinne des Wortes – zu den zielgerichteten sensumotorischen Tätigkeiten des Menschen: Es gilt, das Fahrzeug mit seinen Passagieren oder seinem Transportgut unter Nutzung der verfügbaren sensorischen Informationen mit Hilfe motorischer Eingriffe über die Betätigungseinrichtungen des Fahrzeugs von einem Ausgangsort zu einem Zielort zu bringen.

Komplexe Anforderungssituationen, die den Menschen unvorbereitet treffen und ihm bisher untrainierte Handlungsweisen abverlangen, führen den Menschen auf eine Ebene des „wissensbasierten Verhaltens“ (knowledge-based behaviour). Diese Verhaltensform ist im Kern dadurch gekennzeichnet, dass auf der Basis bereits vorhandenen oder noch zu erwerbenden Wissens in einem mentalen Prozess verschiedene Handlungsalternativen durchgespielt und auf ihre Brauchbarkeit für das angestrebte Ziel geprüft werden, bevor die besteingeschätzte Alternative eventuell als Regel für zukünftige Fälle gespeichert und über motorische Reaktionen umgesetzt wird.

Die nächste Ebene des „regelbasierten Verhaltens“ (rule-based behaviour) unterscheidet sich dadurch von der zuvor beschriebenen, dass die zugehörigen situativen Gegebenheiten bei früheren Gelegenheiten schon häufiger aufgetreten sind und der betreffende Mensch bereits über ein Repertoire von gespeicherten Verhaltensmustern (Regeln) verfügt, dessen nach subjektiver Erfahrung effektivste Variante abgerufen wird.

Die dritte Ebene wird als „fertigkeitsbasiertes Verhalten“ (skill-based behaviour) bezeichnet. Sie ist durch reflexartige Reiz-Reaktions-Mechanismen charakterisiert, die in einem mehr oder weniger lang dauernden Lernprozess eintrainiert werden und dann in einem selbsttätigen, nicht mehr bewusste Kontrolle erfordernden stetigen Fluss ablaufen. Derartige eingespielte Fertigkeiten sind die zeitlich effektivsten Formen menschlichen Verhaltens. Sie sind typisch für routinemäßig wiederkehrende Handlungsabläufe, und sie lassen im Allgemeinen sogar einen gewissen Spielraum für nicht unbedingt aufgabenbezogene Nebenbeschäftigungen.

2.2 Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe nach Donges, 1982

In Abbildung 2-1 ist dieses aus einer psychologischen Herangehensweise entstandene allgemeine Klassifikationsschema für die Arbeitsprozesse des Menschen einer aus Ingenieurssicht abgeleiteten Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe gegenübergestellt [6], Bild 2-1 rechts.

Die Navigationsaufgabe umfasst die Auswahl einer geeigneten Fahrtroute aus dem zur Verfügung stehenden Straßennetz sowie eine Abschätzung des voraussichtlichen Zeitbedarfs. Wenn Informationen über aktuelle Störeinflüsse wie z. B. Unfälle, Baustellen oder Verkehrsstauungen vorliegen, kann eine veränderte Routenplanung erforderlich werden. In einem bisher unbekannten Verkehrsraum verlangt die Navigationsaufgabe einen Prozess der bewussten Planung und ist deshalb der Ebene des wissensbasierten Verhaltens zuzuordnen. In einem vertrauten Verkehrsraum hingegen kann die Navigationsaufgabe als bereits erfüllt angesehen werden. Typisch für die Navigationsebene ist die örtlich punktuelle bzw. zeitlich diskrete Aufgabenerfüllung durch den Fahrer, der die Einhaltung der Fahrtroute anhand markanter Streckenmerkmale überwacht.

Der eigentliche dynamische Prozess des Fahrens spielt sich auf den Aufgabenebenen Führung und Stabilisierung ab. Die Eigenbewegung sowie bewegte fremde Objekte im Fahrraum verursachen eine kontinuierliche Veränderung der Konstellation von sensorischen, insbesondere optischen Eingangsinformationen für den Fahrer. In dieser visuellen Szenerie und ihrer kontinuierlichen Veränderung sind sowohl die Führungsgrößen als auch die Istgrößen der Fahrzeugbewegung enthalten. Die Führungsaufgabe besteht im Wesentlichen darin, aus der vorausliegenden Verkehrssituation sowie aufgrund des geplanten Fahrtablaufs die als sinnvoll erachteten Führungsgrößen wie Sollspur und Sollgeschwindigkeit abzuleiten und antizipatorisch im Sinn einer Steuerung (open loop control) einzugreifen, um günstige Vorbedingungen für möglichst geringe Abweichungen zwischen Führungs- und Istgrößen zu schaffen.

Auf der Stabilisierungsebene hat der Fahrer durch entsprechende korrigierende Stelleingriffe dafür zu sorgen, dass im geschlossenen Regelkreis (closed loop control) die Regelabweichungen stabilisiert und auf ein für den Fahrer annehmbares Maß kompensiert werden.

Für diese beiden Ebenen der Fahraufgabe hat sich die Abbildung in Form kontinuierlicher quantitativer Modelle auf regelungstechnischer bzw.

systemtheoretischer Basis bewährt. Ein Beispiel hierfür folgt im nächsten Abschnitt.

Inwieweit sich die Teilaufgaben Führung und Stabilisierung in den unterschiedlichen Verhaltenskategorien aus [17] abspielen, hängt entscheidend von der individuellen Erfahrung des betreffenden Fahrers und von der bereits erlebten Häufigkeit der jeweiligen Verkehrssituation ab. Ein Fahrerneuling wird seine Fahraktivität anfänglich sehr stark auf der Ebene des wissensbasierten Verhaltens ausüben und erst nach und nach mit wachsender Routine ein Repertoire für Verhaltensregeln und die Fähigkeit unbewusst ablaufender Fertigkeiten entwickeln.

Sobald sich die entsprechende Erfahrung herausgebildet hat, wird die Teilnahme am Straßenverkehr zur alltäglichen Routine, die sich praktisch vollständig auf der Ebene des fertigkeitsbasierten Verhaltens abwickeln lässt. Ein Eindruck über die Dauer dieses Lernvorgangs lässt sich aus der Unfallbeteiligung von Fahranfängern ableiten: Demnach vergehen etwa 7 Jahre bzw. 100 000 km Fahrleistung [1], [21], bis ein Fahrer den ausgelernten Zustand erreicht hat.

Erst das unerwartete Eintreten kritischer Bedingungen zwingt den Fahrer aus dem störungsfreien, subkortikal abarbeitbaren Verkehrsgeschehen heraus in die anspruchsvolleren Ebenen des regel- oder sogar wissensbasierten Verhaltens hinein. Die Ebene des wissensbasierten Verhaltens ist im Straßenverkehr immer dann als kritisch und unfallträchtig einzustufen, wenn die Fahrgeschwindigkeit und der Abstand zur Gefahrenstelle für das mentale Durchspielen von Handlungsalternativen nicht mehr genügend Zeit lassen. Entsprechend wird in [9] gefordert: „Im Straßenverkehr ist der Bedarf für bewusstes Handeln zu minimieren!“

Wie die vorangehenden Überlegungen zeigen, kommt der Führungsebene der Fahraufgabe im Hinblick auf die Sicherheit des Fahrtablaufs eine enorme Bedeutung zu, weil sich in ihr entscheidet, ob die vom Fahrer ausgewählten Führungsgrößen im objektiv sicheren oder unsicheren Bereich liegen, und ob der Fahrer aus den sensorischen Eingangsinformationen rechtzeitig die notwendigen Schlüsse ableiten kann. Für diese Ebene der Aufgabenhierarchie bringt der Mensch die hervorragende Fähigkeit der vorausschauenden (antizipatorischen) Wahrnehmung des Verkehrsraums mit, die ihn – wie in [4] experimentell nachgewiesen wurde – in die Lage versetzt, auch antizipatorisch zu handeln und damit systemimmanente Verzögerungszeiten zu kompensieren.

In der Stabilisierungsebene bilden der Fahrer als Regler und das Fahrzeug als Regelstrecke das bekannte, eng miteinander gekoppelte dynamische System, dessen Stabilisierungsfunktion vom erfahrenen Fahrer auf der Ebene des fertigkeitsbasierten Verhaltens abgearbeitet wird.

In Bild 2-1 sind die vorangehenden Überlegungen andeutungsweise durch die Dicke der grau unterlegten Verbindungspfeile zwischen den drei Ebenen der beiden Modellansätze dargestellt.

2.3 Beispiel eines regelungstechnischen Modellansatzes für die Führungs- und Stabilisierungsebene der Fahraufgabe

Zur Nachbildung des Fahrerverhaltens im dynamischen Kernprozess der Fahrzeugführung werden vor allem regelungstechnische Modelle entwickelt, z. B. [13], [8], [20], [15]. Das besondere Leistungsvermögen dieses Ansatzes ermöglicht, ohne Kenntnis der inneren Struktur der menschlichen Informationsaufnahme, -verarbeitung und -ausgabe kausale Zusammenhänge zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen des Menschen zu identifizieren. Eine derart vereinfachende Beschreibung ist von vornherein mit der Einschränkung verbunden, dass sie nur die mit diesen Größen beobachtbaren Phänomene erfassen kann und somit zwangsläufig unvollständig ist. Sie hat dennoch wichtige, vor allem quantitative Erkenntnisse hervorgebracht, die das menschliche Übertragungsverhalten in den Dimensionen von Amplitude und Zeit beschreiben und klare Hinweise auf die Adaptationsfähigkeit des Menschen, aber auch seine Leistungsgrenzen liefern.

Der früheste Ansatz eines Fahrermodells stammt aus Japan [13] (zitiert nach [12]) und beschreibt das Lenkverhalten bei Seitenwindstörungen. Er beinhaltet bereits ein Prinzip zur Nachbildung der menschlichen Fähigkeit zur vorausschauenden Wahrnehmung des Fahrraums in Form einer Vorausschaulänge (preview distance). In Höhe dieser Vorausschaulänge versucht der Fahrer die Querabweichung zwischen Sollkurs und Fahrzeuglängsachse zu kompensieren. Im deutschsprachigen Raum wurde später für diesen Ansatz der Begriff „Deichselmodell“ gebräuchlich.

Im Unterschied dazu separiert das Fahrermodell in [4] (Kurzfassung in [5]) die beiden Ebenen Führung und Stabilisierung der Fahraufgabe in zwei Teilmodelle: Die Führungsebene wird in Form einer „Antizipatorischen Steuerung“ (open loop control) und die Stabilisierungsebene als „Kompensatorische Regelung“ (closed loop control) abgebildet, **Bild 2-2**. Daneben gibt es einen Beitrag

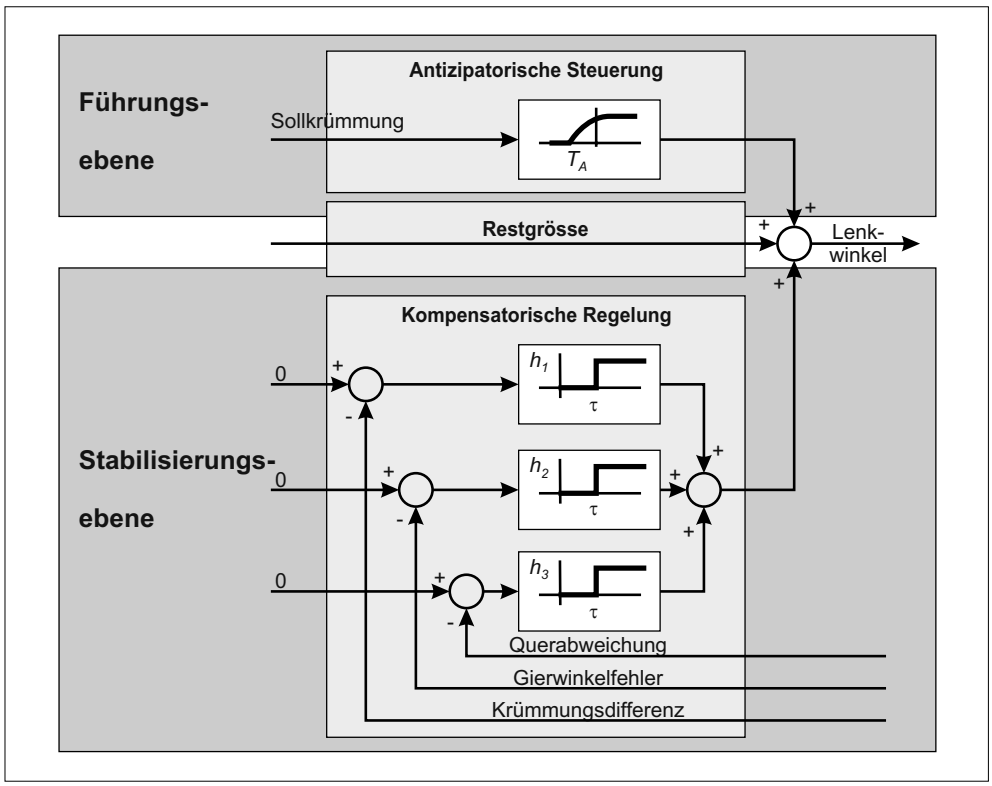


Bild 2-2: Blockschaltbild des Zwei-Ebenen-Modells für das Fahrerlenkverhalten

„Restgröße", der die von den beiden Teilmodellen nicht reproduzierten Anteile der Fahrerreaktion beinhaltet.

Dieses Fahrermodell beschreibt zunächst nur den querdynamischen Anteil der Fahraufgabe, ist jedoch in seiner Grundstruktur auch für die Nachbildung der Längsdynamik geeignet. Die experimentelle Datenbasis für dieses Modell stammt aus Simulatorversuchen auf einem kurvenreichen Rundkurs ohne sonstigen Verkehr. Es umgeht die Ableitung einer Solltrajektorie und einer Sollgeschwindigkeit, indem es die Testfahrer in der Versuchsanweisung auffordert, genau der Straßenmittellinie und einem vorgegebenen Geschwindigkeitsprofil zu folgen. Erst spätere Arbeiten wie z. B. [16] schufen die Grundlagen für die Modellierung von Solltrajektorie und Sollgeschwindigkeit mithilfe von Optimierungskriterien, die die Zielvorstellungen des Fahrers für den jeweiligen Fahrtzweck gewichten und das Verlassen des einzuhaltenden Fahrstreifens durch entsprechende Grenzkriterien (constraints) vermeiden.

Eingangsgröße für das Teilmodell „Antizipatorische Steuerung" ist die um eine Antizipationszeit vorgezogene Sollkrümmung der Sollspur (Straßenmittellinie), die über einen Verstärkungsfaktor und ein glättendes Verzögerungsglied den entsprechenden antizipatorischen Anteil der Lenkreaktion produziert. Im Teilmodell „Kompensatorische Regelung" werden parallel drei an der Fahrerposition gemessene Zustandsgrößen Krümmungsdifferenz (Differenz der Krümmungen von Soll- und Istspur), Gierwinkelfehler (Winkel zwischen Tangente an die Sollspur und Fahrzeuglängsachse) und Querabweichung zur Sollspur jeweils über einen zugehörigen Verstärkungsfaktor und verzögert um dieselbe Fahrertotzeit (Reaktionszeit im geschlossenen Regelkreis) zurückgeführt.

Die genannten Eingangsgrößen für beide Teilmodelle können vom Fahrer aus statischen und bewegten Mustern in der perspektivischen Außensicht des vorausliegenden Fahrraums wahrgenommen werden [4].

Die aus den Messergebnissen ermittelten Modellparameter zeigen folgende Eigenschaften [5]:

Im Teilmodell „Antizipatorische Steuerung“ entspricht der Verstärkungsfaktor praktisch dem Kehrwert der Fahrzeugverstärkung (auch als Lenkempfindlichkeit des Fahrzeugs bezeichnet), weil Soll- und Istkrümmung der Fahrspur im stationären Zustand nah beieinander liegen müssen. Die Antizipationszeiten der Lenkreaktion liegen weitgehend unabhängig von den Versuchsbedingungen in der Größenordnung von 1 s. Das bedeutet bezogen auf den oben erwähnten frühesten Fahrermodellansatz [13] eine proportional mit der Fahrgeschwindigkeit wachsende Vorausschaulänge. Die Zeitkonstante des Verzögerungsglieds sinkt signifikant mit wachsender Fahrgeschwindigkeit, d. h. der Anstieg der antizipatorischen Lenkreaktion erfolgt umso schneller, je höher die Fahrgeschwindigkeit ist.

Im Teilmodell „Kompensatorische Regelung“ trägt der Gierwinkelfehler mit Abstand am stärksten zur kompensatorischen Lenkreaktion bei, d. h. von den drei rückgekoppelten Zustandsgrößen kann der Gierwinkelfehler als Hauptregelgröße, die Krümmungsdifferenz als D-Anteil und die Querabweichung als I-Anteil eines PID-Reglers interpretiert werden. Beim Verstärkungsfaktor der Krümmungsdifferenz zeigt sich ein signifikanter Anstieg mit der Fahrgeschwindigkeit, d. h. entsprechend wächst der vorhaltende Beitrag im kompensatorischen Lenkwinkel. Gleichzeitig verkürzt sich die Fahrertotzeit ebenfalls signifikant. Höhere Fahrgeschwindigkeiten verlangen also schnellere Reaktionszeiten vom Fahrer. Das lässt sich auch mithilfe des Schnittfrequenzmodells [14] erklären: Die Stabilitätsreserven der Fahrzeugquerdynamik nehmen mit wachsender Fahrgeschwindigkeit ab und müssen im geschlossenen Regelkreis durch verkürzte Fahrertotzeiten kompensiert werden, um eine ausreichende Stabilitätsreserve des Gesamtsystems Fahrer-Fahrzeug aufrechtzuerhalten.

2.4 Zeitkriterien

Die gerade beschriebenen Korrelationen zwischen dem Zeitverhalten des Fahrers und der Fahrgeschwindigkeit sind ein Beispiel für die Adaptationsfähigkeit des Menschen an die jeweiligen Randbedingungen. Die identifizierten Mittelwerte der Antizipationszeit von 1 s und der Totzeit des Fahrers von 0,5 s sind Anhaltspunkte für die folgenden Betrachtungen zum Zeitverhalten.

Bild 2-3 vermittelt einen Überblick über die Zeithorizonte, die die drei Ebenen der Fahraufgabe charakterisieren.

Der typische Zeithorizont der Navigationsebene erstreckt sich von der möglichen Gesamtdauer einer Fahrt im Bereich einiger Stunden bis in die Region der Ankündigung bevorstehender Streckenände-

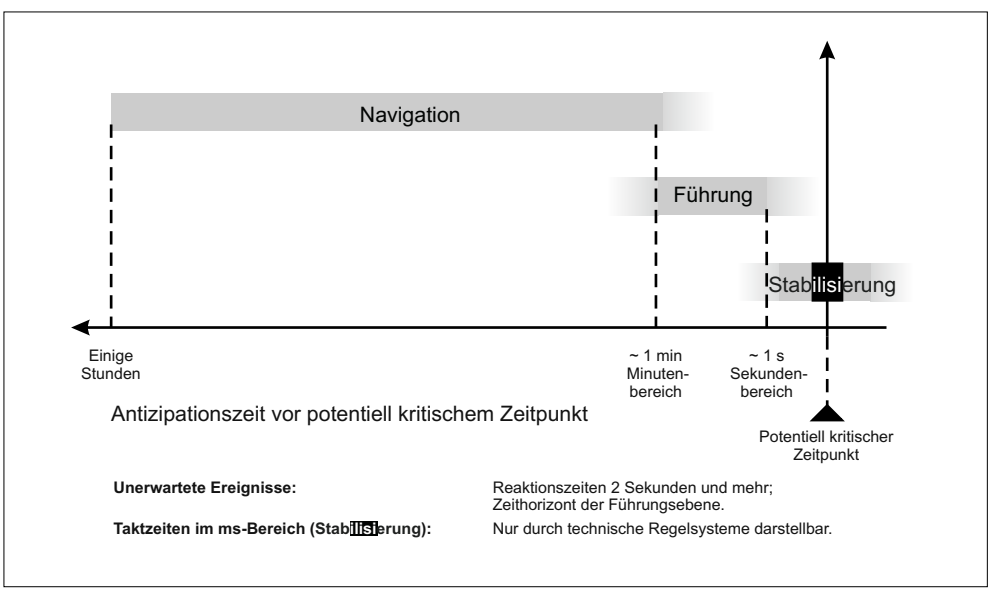


Bild 2-3: Typische Zeithorizonte der Navigations-, Führungs- und Stabilisierungsaufgabe

rungen im Minutenbereich, z. B. durch Beschilderung. Auch heutige Navigationssysteme beginnen entsprechend früh mit ersten Vorankündigungen, die dann während der Annäherung an den entscheidenden Ort wiederholt und konkretisiert werden.

Dann setzt als wesentlicher Teil der Führungsaufgabe unter günstigen Sichtverhältnissen bereits die optische Wahrnehmung der Straßengeometrie und der Verkehrssituation mit der Ableitung der Führungsgrößen und der antizipatorischen Einleitung von Stelleingriffen ein. Geschwindigkeitskorrekturen durch Lastwechsel oder Bremsbetätigung haben üblicherweise einen größeren Vorlauf als Lenkaktionen. Wenn typische Antizipationszeiten für Stelleingriffe am Lenkrad im Bereich von 1 s liegen, muss die Wahrnehmung der entsprechenden Gegebenheiten bereits deutlich früher beginnen, insbesondere bei unerwarteten Ereignissen. D. h.: Informationssysteme oder Warnsysteme, die eine kognitive Verarbeitung erfordern, sollten eine Antizipationszeit von 2 bis 3 s möglichst überschreiten. Einer Arbeit neueren Datums entsprechend müssen beispielsweise Warnsignale für Spurwechselentscheidungen spätestens 2 Sekunden zuvor gegeben werden [18]. Wenn dies nicht realisierbar ist (z. B. aufgrund der begrenzten Reichweite von Umfeldsensoren), kann nur eine spontan angeregte Reaktion durch eine intuitiv wirkende Handlungsempfehlung, beispielsweise in Form einer haptischen Anzeige wie beim Aktiven Fahrpedal oder Lenkrad, helfen.

Typische Stelleingriffe zur Kompensation von Regelabweichungen auf der Stabilisierungsebene erfolgen wie beschrieben mit einer Nacheilung von einigen 100 ms, wobei Fahrertotzeiten im geschlossenen Regelkreis als Kennzahl für fertigkeitsbasiertes Handeln eher eine Untergrenze darstellen. Taktzeiten im ms-Bereich (schwarze Zone in Bild 2-3) können deshalb nur durch technische Regelsysteme dargestellt werden, wie dies z. B. im ABS, ASR und ESP realisiert ist. Reaktionszeiten auf unerwartete Ereignisse liegen im Bereich von etwa 2 bis 3 s, je nach Komplexität der Situation möglicherweise deutlich darüber. Wie wichtig frühzeitige Aktionen/Reaktionen des Fahrers für die Unfallvermeidung sind, schätzt Enke ab [7]: Etwa die Hälfte aller Kollisionsunfälle könnte durch Vorverlegung der Fahrerreaktion um eine halbe Sekunde vermieden werden. Eine Beschleunigung der Fahrerreaktion um einen Zeitvorhalt in dieser Größenordnung scheint nur durch eine Stärkung von antizipatorischen Reaktionen erreichbar, also auf der Führungsebene der Fahraufgabe.

2.5 Neuer Ansatz zur Quantifizierung von fertigkeits-, regel- und wissensbasiertem Verhalten im Straßenverkehr

Die Drei-Ebenen-Hierarchie des menschlichen Reaktionsverhaltens von Rasmussen, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, ist zunächst ein qualitatives Modell. In [2] wird ein neuer, zugegebenermaßen gewagter Ansatz zur Annäherung an eine Quantifizierung der Begriffe fertigkeits-, regel- und wissensbasiertes Verhalten im Straßenverkehr eingeführt. Angeregt wurde dieser Vorschlag durch die messtechnische

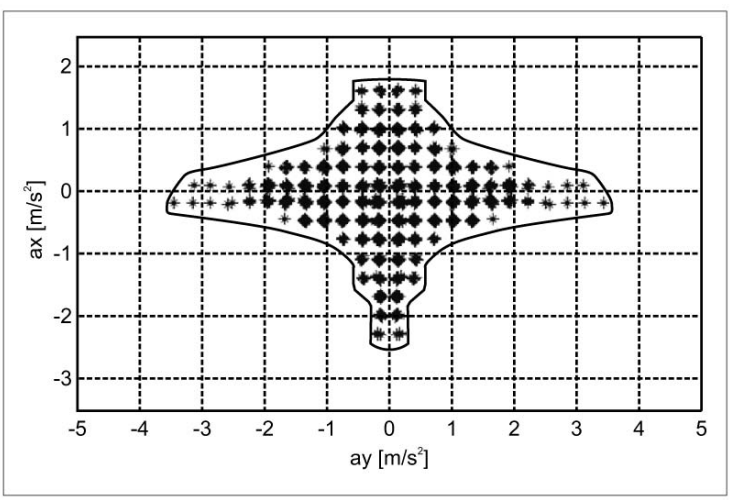


Bild 2-4
g-g-Diagramm des Fahrertyps „normal“ aus [19]

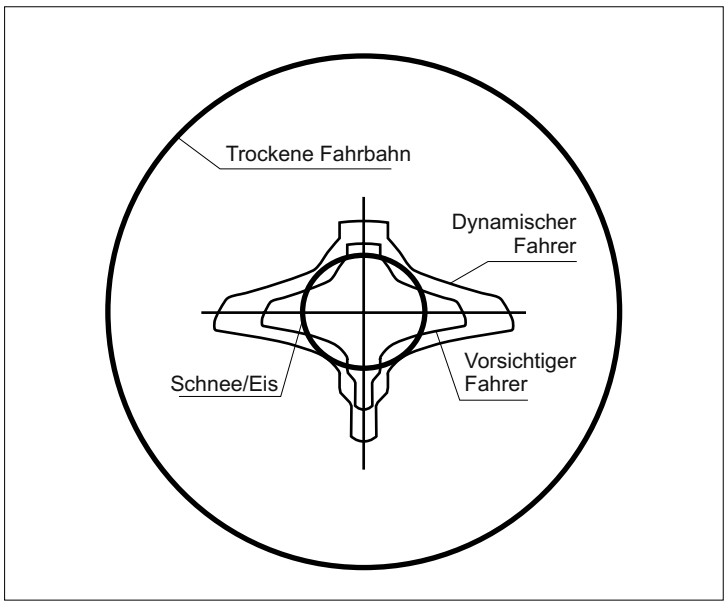


Bild 2-5
Fahrverhaltenskollektive und Kraftschlussgrenze (unterschiedliche Fahrertypen, veränderte Kraftschlussgrenzen)

Erfassung von Fahrverhaltenskollektiven, die bisher in der deutschsprachigen Fachliteratur eher selten dokumentiert worden sind [3], [10], [19].

Zur Erläuterung dieses Ansatzes soll als Beispiel **Bild 2-4** aus [19] dienen.

Dieses Diagramm zeigt den Bereich von Quer- und Längsbeschleunigungen, die zwölf Fahrer vom Fahrertyp „normal“ während jeweils ca. zweieinhalbstündiger Fahrten im öffentlichen Verkehr auf einer Versuchsstrecke mit kurvigen Landstraßen und Autobahnen genutzt haben. Die einhüllende Linie stellt dabei eine 85-Perzentil-Linie dar, d. h. alle Fahrer bleiben in 85 % der Fahrzeit unterhalb dieser Hüllkurve. Die Hüllkurve selbst weist eine etwas ausgerundete Kreuzform auf. Dies besagt, dass das untersuchte Fahrerkollektiv nur bedingt in der Lage ist, kombinierte Lenk-Brems- oder Lenk-Beschleunigungsmanöver auszuführen, sondern bevorzugt entweder lenkt oder bremst oder beschleunigt. Diese Beobachtung wird durch andere Messergebnisse von Fahrverhaltenskollektiven erhärtet.

Man stelle sich nun vor, dass in analoger Weise die Häufigkeitsverteilung und die Hüllkurve des Verhaltenskollektivs für einen individuellen Fahrer registriert werden, und zwar nicht nur für Längs- und Querbeschleunigung, sondern auch für andere relevante, das Fahrerverhalten charakterisierende Messgrößen, wie z. B. inverser Abstand und Differenzgeschwindigkeit gegenüber einem vorausfahrenden Fahrzeug. Auf diese Weise lässt sich ein mehr oder weniger umfangreiches Abbild des personalisierten Erfahrungshorizonts und somit der Verkehrskompetenz des betreffenden Fahrers ermitteln.

Dieses Bild soll dazu dienen, in einem pragmatischen Ansatz zu definieren:

- Der fertigkeitsbasierte Bereich umfasst die 80-Perzentil-Einhüllende des Längs- und Querbeschleunigungskollektivs eines individuellen Fahrers,
- der regelbasierte Bereich reicht bis zum 95. Perzentil, und
- die darüber hinausgehenden Fahrzustände als seltene Ereignisse sind vor allem dem wissensbasierten Bereich zuzuordnen.

(Die Zahlenwerte 80. und 95. Perzentil, die nicht im Bild gezeigt werden, sind als willkürlich gewählte Anhaltswerte zu verstehen, die gegebenenfalls experimentell genauer abzusichern sind.)

Für unterschiedliche Fahrertypen wird der jeweils individuelle Erfahrungshorizont vom eher kleinen Umfang beim zurückhaltenden, vorsichtigen Fahrer bis zum sehr ausgedehnten Fahrverhaltensrepertoire beim sportlich ambitionierten, dynamischen Fahrer reichen, **Bild 2-5**. Auch intraindividuell kann der Fahrstil des Fahrers je nach Gemütslage in einer Spannweite von defensiv (innerhalb der 80-Perzentil-Einhüllenden) über offensiv (innerhalb der 95-Perzentil-Einhüllenden) bis hin zu aggressiv (die 95-Perzentil-Einhüllende überschreitend) variieren.

Die bisher bekannten Messungen zeigen durchgängig, dass auf trockener Fahrbahn die entsprechenden Fahrverhaltenskollektive im Verkehr auf öffentlichen Straßen deutlich unterhalb der Kraftschlussgrenze (Kammscher Kreis) bleiben. Wenn allerdings Witterungsverhältnisse wie Fahrbahnnässe, Schnee oder Eis das Kraftschlusspotenzial erheblich vermindern, kann es dazu kommen, dass selbst das schmale Fahrverhaltenskollektiv des vorsichtigen Fahrers die Grenze des Kammschen Kreises überschreitet und das Unfallrisiko unter diesen Umständen erheblich ansteigen kann, Bild 2-5.

Anhand dieses Bildes soll Folgendes hervorgehoben werden: Neben der physikalischen Grenze des Kraftschlusspotenzials charakterisiert durch den Kammschen Kreis gibt es eine zweite wesentliche Einflussgröße auf die Verkehrssicherheit, die bisher wenig Beachtung gefunden hat: die Grenze der Verkehrskompetenz des individuellen Fahrers, die durch die Einhüllende des Fahrerverhaltenskollektivs und seiner Perzentile als jeweiliger Erfahrungshorizont quantifiziert und für Fahrerassistenzsysteme genutzt werden kann. Derartigen Grenzen des Erfahrungshorizonts könnte aus statistischer Sicht bezüglich der Unfallrelevanz sogar eine stärkere Bedeutung zukommen als der Kraftschlussgrenze, weil ihre Überschreitung ganzjährig in Gefahr ist.

2.6 Folgerungen für Fahrerassistenzsysteme

Die Anwendung des Drei-Ebenen-Modells von Rasmussen und der oben beschriebene Versuch seiner Quantifizierung fördern zwei wesentliche Erkenntnisse zutage:

- Fahrerassistenzsysteme sollten mithelfen, eine Sicherheitsreserve einerseits gegenüber der Kraftschlussgrenze, andererseits aber insbesondere gegenüber dem Erfahrungshorizont der Fahrer aufrechtzuerhalten.
- In kritischen dynamischen Situationen spannt sich zwischen dem individuellen Erfahrungshorizont des Fahrers und der Kraftschlussgrenze ein potenzieller Eingriffsbereich für Fahrerassistenzsysteme auf. Dort kann die überwiegend einkanalige Reaktionsweise des Fahrers (Lenken oder Bremsen bzw. Lenken oder Beschleunigen) vor allem durch kombinierte Lenk-Brems- oder Lenk-Beschleunigungsmanöver ergänzt werden.

Das Drei-Ebenen-Modell der Fahraufgabe mit den quantitativen Ergebnissen der entsprechenden Fahrermodelle weist vor allem die Führungsebene als vielversprechendes Feld für zukünftige Fahrerassistenzsysteme aus. Auch hier treten zwei Auslegungskriterien hervor:

- Für Fahrerassistenzsysteme mit informierender, warnender oder handlungsempfehlender Funktion sollte bei unerwarteten Ereignissen eine Antizipationszeit von mindestens zwei Sekunden eingehalten werden.
- Reaktionsanforderungen, die im Zeitraum von weniger als ein bis zwei Zehntelsekunden beantwortet werden müssen, können nur durch automatisch eingreifende Technologien erfüllt werden, wie z. B. heute bereits durch ABS, ASR und ESP.

Quellenverzeichnis

[1] *Anon.*: Unfalldisposition und Fahrpraxis. Automobiltechnische Zeitschrift 78 (1976), S. 129
[2] *Braess, H.-H.*; *Donges, E.*: Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen – „Konsumierbare“ oder echte Verbesserungen? 2. Tagung „Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz“, TU München, Garching bei München, 4.–5. April 2006
[3] *Burckhardt, M.*: Fahrer, Fahrzeug, Verkehrsfluß und Verkehrssicherheit – Folgerungen aus den Bewegungsgesetzen für Fahrzeug, Straße und Fahrer. In: Interfakultative Zusammenarbeit bei der Aufklärung von Verkehrsunfällen. Band XXX der AFO, Köln, 1977
[4] *Donges, E.*: Experimentelle Untersuchung und regelungstechnische Modellierung des Lenkverhaltens von Kraftfahrern bei simulierter Straßenfahrt. Diss. TH Darmstadt 1977
[5] *Donges, E.*: Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug. Zeitschrift für Verkehrssicherheit 24 (1978), S. 98–112
[6] *Donges, E.*: Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. Automobil-Industrie 27 (1982), S. 183–190
[7] *Enke, K.*: Possibilities for improving safety within the driver-vehicle-environment control loop. ESV-Konferenz 1979, Berichtsband, S. 789–802
[8] *Fiala, E.*: Lenken von Kraftfahrzeugen als kybernetische Aufgabe. Automobiltechnische Zeitschrift 68 (1966), S. 156–162
[9] *Förster, H. J.*: Menschliches Verhalten, eine vergessene Ingenieur-Wissenschaft? Abschiedsvorlesung U. Karlsruhe, Januar 1987
[10] *Hackenberg, U.*; *Heißing, B.*: Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr. Automobiltechnische Zeitschrift 84 (1982), S. 341–345

[11] *Johannsen, G.*: Fahrzeugführung und Assistenzsysteme. In: Ingenieurpsychologie. Hrsg. von B. Zimolong und U. Konradt. Enzyklopädie der Psychologie: Wirtschafts-, Organisations- und Arbeitspsychologie – Band 2, Hogrefe Verlag, 2006
[12] *Jürgensohn, T.*: Hybride Fahrermodelle. Sinzheim, Pro Universitate Verlag, 1997
[13] *Kondo, M.*: Richtungsstabilität (wenn Steuerbewegungen hinzukommen). Journal of the Society of Automotive Engineers of Japan (JSAE), Jidoshagiutsu, Vol. 7, No. 5,6, Tokyo 1953, S. 104–106, 109, 123, 136–140 (in japanisch, zitiert nach [12])
[14] *McRuer, D. T.*; *Krendel, E. S.*: The Man-Machine System Concept. Proc. IRE 50 (1962), S. 1117–1123
[15] *Mitschke, M.*; *Niemann, K.*: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug bei Störung durch schiefziehende Bremsen. Automobiltechnische Zeitschrift 76 (1974), S. 67–72
[16] *Prokop, G.*: Modeling Human Vehicle Driving by Model Predictive Online Optimization. Vehicle System Dynamics, 2001, Vol. 11, No. 1, S. 1–35
[17] *Rasmussen, J.*: Skills, Rules and Knowledge; Signals, Signs and Symbols and other Distinctions in Human Performance Models. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC 13, No. 3 (1983), S. 257–266
[18] *Wakasugi, T.*: A study on warning timing for lane change decision and systems based on driver's lane change maneuver. ESV-Konferenz 2005, Paper 05-0290
[19] *Wegscheider, M.*; *Prokop, G.*: Modellbasierte Komfortbewertung von Fahrer-Assistenzsystemen. VDI-Ber. Nr.1900, 2005, S. 17–36
[20] *Weir, D. H.*; *McRuer, D. T.*: Dynamics of Driver Steering Control. Automatica 6 (1970), S. 87–98
[21] *Willmes-Lenz, G.*: Internationale Erfahrungen mit neuen Ansätzen zur Absenkung des Unfallrisikos junger Fahrer und Fahranfänger. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft M 144, 2003

3 Fahrerassistenz und Verkehrssicherheit

Christhard Gelau, Tom Michael Gasser, Andre Seeck

3.1 Einleitung

Einer weit verbreiteten Auffassung zufolge sind ca. 95 % aller Unfälle im Straßenverkehr zumindest anteilig auf die Ursache „Human Error" zurückzuführen. Weiterhin soll menschlichem Fehlverhalten bei ca. 75 % der Straßenverkehrsunfälle der Status einer „Alleinursache" zukommen [1] [7]. Zitiert wird in diesem Zusammenhang häufig eine frühe Studie von Treat und Mitarbeitern [5], die aufgrund einer Detailanalyse von 2.258 Unfallprotokollen zu dem Ergebnis kam, dass menschliches Fehlverhalten als Ursachenfaktor in 93 % der Fälle (gegenüber 34 % Umweltfaktoren und 13 % Fahrzeugfaktoren) beteiligt waren. Ungeachtet der erkenntnistheoretischen Probleme, die ein allzu leichtfertiger Umgang mit dem Ursachenbegriff in diesem Falle mit sich bringt, dürfen die Entstehungsbedingungen „menschlichen Versagens" [6] natürlich nicht unreflektiert bleiben, wenn es um die Entwicklung zielführender Ansätze und Maßnahmen zur Einschränkung des Unfallgeschehens geht. Eine im Zusammenhang mit „menschlichem Versagen" häufig thematisierte Unfallursachenkategorie ist beispielsweise die des „Looked-but-Failed-to-See". Gemeint sind damit Unfälle, bei denen sich das kritische Hindernis oder Fahrzeug durchaus im Sehfeld der den Unfall verursachenden Fahrer befand, ohne dass es von ihnen *erkannt* wurde, um auf dieser Grundlage dann die erforderlichen, den Unfall möglicherweise vermeidenden Fahrhandlungen auszuführen. Aus psychologischer Sicht wird dieses Phänomen zumeist mit Kapazitätsbegrenzungen der visuellen Aufmerksamkeit, der Selektivität des Prozesses des visuellen Abtastens oder der fehlerhaften Integration relevanter Merkmale der Szenerie erklärt [1].

Aus theoretischer Sicht wird die Entstehung eines Unfalls immer wahrscheinlicher, wenn die Anforderungen der Verkehrssituation die Leistungsmöglichkeiten des Fahrers übersteigen, d. h. die Aufgabenschwierigkeit ein für ihn bewältigbares Maß übersteigt [3]. Akzeptiert man nun im System „Fahrer-Fahrzeug-Umwelt" die Verkehrsumgebung als eine nur sehr schwer modifizierbare Konstante und unterstellt weiterhin, dass die überwiegende Mehrzahl der Fahrten mit Fahrzeugen durchgeführt wird, die entsprechend den geltenden Vorschriften verkehrssicher sind, erscheint die sicherlich kritisierbare Schätzung des erwähnten Ursachenanteils von „Human Error" am Unfallgeschehen im Straßenverkehr aber nicht unplausibel. Moderne Fahrerassistenzsysteme (FAS, oder auch ADAS = Advanced Driver Assistance Systems) werden daher mit dem Ziel entwickelt und implementiert, diese Diskrepanzen zwischen den Anforderungen der Verkehrssituation und dem Leistungsvermögen des Fahrers zu beseitigen, indem ihm beispielsweise durch Warnhinweise zusätzliche zeitliche Spielräume für die Planung und Durchführung sicherer Fahrhandlungen eingeräumt werden oder aber auch durch Eingriffe in die Fahrdynamik bereits verlorengegangene Kontrolle zurückgegeben wird.

Im vorliegenden Kapitel werden daher zunächst die aufgrund von Unfalldatenanalysen zu erwartenden Auswirkungen von FAS auf die Verkehrssicherheit diskutiert. Befürchtungen möglicher negativer Auswirkungen, die unter dem Stichwort Verhaltensanpassung („Behavioural Adaptation") zuweilen in der Literatur geäußert wurden, werden dabei berücksichtigt. Dieser stark an psychologischen Kriterien orientierten Darstellung folgt eine Bewertung von FAS aus Sicht von Ratings und kraftfahrzeugtechnischen Vorschriften. Das Kapitel schließt sodann mit einer juristischen Bewertung autonom eingreifender FAS unter Berücksichtigung des Wiener Übereinkommens über den Straßenverkehr aus dem Jahre 1968.

3.2 Erwartete Auswirkungen von Fahrerassistenzsystemen auf die Verkehrssicherheit

Bei der Abschätzung der zu erwartenden positiven Auswirkungen von FAS auf die Verkehrssicherheit sind mehrere Herangehensweisen denkbar. Eine naheliegende Möglichkeit setzt beim Unfall direkt an und fragt entsprechend der eingangs formulierten Zielsetzung der Entwicklung und Implementierung von FAS nach den vorausgegangenen Fehlhandlungen und deren Ursachen auf Seiten des Fahrers. Erforderlich ist hierfür die Verfügbarkeit einer möglichst großen (und wenn möglich repräsentativen) Stichprobe möglichst detaillierter Unfallprotokolle. Sofern es gelingt, mit dieser Information die den Unfällen vorausgegangenen Fehlhandlungen möglichst eindeutig zu identifizieren, werden auf dieser Grundlage Assistenz-

funktionen beschrieben, die geeignet sein sollten, durch Information, Warnung oder Eingriff in die Fahrzeugführung den Fehler zu korrigieren oder auch die Schwere der Konsequenzen zu mindern. Die Schätzung des Unfallvermeidungspotenzials der jeweiligen Assistenzfunktion erfolgt sodann über die Anteile der Unfälle in der jeweils zugrunde liegenden Stichprobe, aus der sie zuvor aufgrund gemeinsamer Ursachen bei bestimmten Unfallhäufungen abgeleitet worden war. Einen derartigen Ansatz verfolgten beispielsweise Vollrath et al. [10] in einem von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) beauftragten Projekt. Grundlage für die hier vorgenommene Abschätzung des Unfallvermeidungspotenzials von FAS stellte die In-Depth-Analyse von 2.813 Unfallprotokollen aus dem Raum Braunschweig dar. Bei allen Unfällen war der polizeilich registrierte Unfallverursacher ein PKW und der Fahrer 18 Jahre oder älter. Ohne an dieser Stelle auf alle Details im mehrstufigen Verfahren der Ziehung dieser Stichprobe eingehen zu können, soll hinsichtlich der Ergebnisse festgehalten werden, dass die Autoren einen ersten Schwerpunkt in Sachen Unterstützungsbedarf bei Einbiegen/Kreuzen-Unfällen erkannten und schlussfolgerten, dass durch eine entsprechende Warnfunktion („Kreuzungsassistent“, vgl. Kapitel 37) 26,2 % der analysierten schweren Unfälle hätten vermieden werden können. Mit Blick auf die Gesamtheit der von ihnen analysierten Unfälle stellen sie ein Unfallvermeidungspotenzial von FAS im Bereich von 70 % fest.

Es darf nicht übersehen werden, dass der hier skizzierte und anhand der Studie von Vollrath et al. [10] exemplarisch belegte „a posteriori-Ansatz“ zur Abschätzung der Auswirkungen von FAS auf die Verkehrssicherheit nicht die einzige denkbare Option darstellt und darüber hinaus auch einige methodisch bedingte Einschränkungen birgt [9]. Zunächst muss man sich die stillschweigende Annahme vergegenwärtigen, dass bei den zur Disposition stehenden Unfällen die Aktivierung der jeweiligen Assistenzfunktion tatsächlich zur Vermeidung des Unfalls geführt hätte. Dies setzt aber wiederum voraus, dass die vom System an die Fahrer übermittelte Information ihrerseits überhaupt wahrgenommen, angemessen interpretiert und in eine situationsangepasste Fahrhandlung übersetzt wurde. Dieser Umstand weist sicherlich auf die herausragende Bedeutung einer nutzergerechten Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle hin, macht darüber hinaus jedoch auch deutlich, auf welchen Vorannahmen ein solcher Ansatz zur Abschätzung der Auswirkungen von FAS beruht. Nicht übersehen werden sollten aus methodischer Sicht daher auch die Möglichkeiten quasi-experimentell angelegter Feldstudien bzw. deren metaanalytischer Evaluation, die sich bereits für andere Maßnahmenansätze zur Steigerung der Verkehrssicherheit bewährt haben [2]. Das wesentliche Problem dieses Ansatzes liegt jedoch in der Notwendigkeit, über mehr oder minder marktreife Systeme für den Einsatz in Evaluationsstudien verfügen zu können.

Eine methodische Erweiterung des hier dargestellten „a posteriori-Ansatzes“ zur Abschätzung der Auswirkungen von FAS auf die Verkehrssicherheit stellen die um eine psychologische Unfallanalyse ergänzten Erhebungen am Unfallort dar, wie sie von der AARU (Audi Accident Research Unit), einer interdisziplinären Forschungsgemeinschaft, und dem Klinikum der Universität Regensburg seit Juli 2002 praktiziert werden [25]. Gegenstand dieser Analyse sind die subjektiven Schilderungen der Ereignisse im Vorfeld des Unfalls durch die beteiligten Fahrer, die sodann einer Klassifikation hinsichtlich der im Interview benannten Handlungsfehler unterzogen werden.

Bild 3-1 (nach [26]) zeigt exemplarisch die Ergebnisse einer entsprechenden Analyse, bei der Auftretenshäufigkeiten unterschiedlicher Fehlerkategorien einem Altersgruppenvergleich unterzogen wurden. Dem zugrunde lag eine Stichprobe von 244 Interviews, die im Anschluss an einen Unfall mit dem jeweils polizeilich ermittelten Hauptverursacher durchgeführt wurden. Auffällig ist hier das deutliche Überwiegen der so genannten „Informationsfehler“, d. h. der Nichtverfügbarkeit der für die Fahrhandlung zur Vermeidung des Unfalls erforderlichen Information in den befragten Altersgruppen. Die Frage, ob und in welchem Umfang Befragungsartefakte bei der Erklärung dieses Ergebnisses mit berücksichtigt werden müssen, kann an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden.

Ein letzter Aspekt, der bei der Abschätzung der Auswirkungen von FAS auf die Verkehrssicherheit aber keinesfalls übersehen werden sollte, ist schließlich das Phänomen der Verhaltensadaptation (behavioural adaptation) auf Seiten der Fahrer an die ihnen verfügbar gemachten Möglichkeiten. In einem einschlägigen Bericht der OECD [4] wird dieses Phänomen wie folgt definiert: *„Behavioural adaptations are those behaviours which may occur following the introduction of changes to the road-vehicle-user system and which were not intended by the initiator of this change.“* Es wird in diesem Bericht weiter ausgeführt: *„Behavioural adaptations occur as road users respond to changes in the road transport system such that their personal needs are achieved as a result, they create a continuum of effects ranging from a positive increase in safety to a decrease in safety.“*

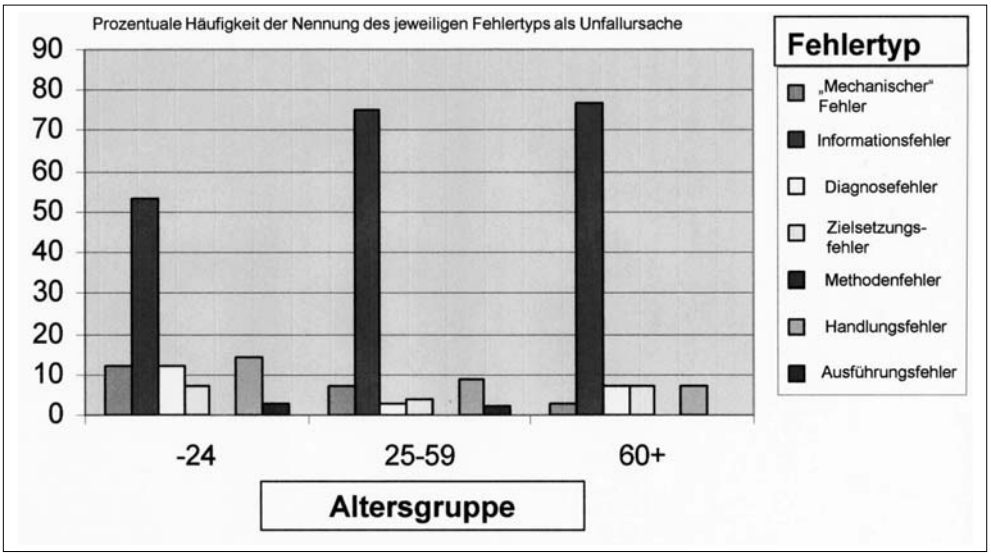


Bild 3-1: Häufigkeit von Fehlertypen in Abhängigkeit von der Altersgruppe [nach 26]

Inspiriert wurde die Elaboration dieses Konzepts sicherlich maßgeblich durch die von Gerald J. S. Wilde [11] entwickelte und vertretene Theorie der Risikohomöostase (Risk Homeostasis Theory = RHT). Dies führte dazu, dass Begriffe wie Verhaltensadaptation (behavioural adaptation), Risikohomöostase oder auch Risikokompensation (risk compensation) häufig synonym verwendet werden. Aus diesem Grund soll an dieser Stelle zumindest verdeutlicht werden, dass Verhaltensadaptation keineswegs die Annahme einer homöostatischen Regelung des wahrgenommenen (statistischen!) Risikos an eine individuelle Risikozielgröße impliziert, wie es von der RHT [11] angenommen wird. Verhaltensadaptation trägt als Konzept ohne Annahmen über die zugrunde liegenden Wirkmechanismen dem Umstand Rechnung, dass Fahrer die ihnen z. B. durch ein FAS zur Verfügung gestellten zusätzlichen Möglichkeiten wahrnehmen und bei deren Nutzung ihre Motive und Werthaltungen einfließen lassen – was dazu führen kann, dass die vom Entwickler intendierten Effekte nicht in vollem Umfang erzielt werden können [8].

Zur Frage, welche FAS nun konkret die größten Beiträge zur Steigerung der Verkehrssicherheit und zur Erreichung der von der Europäischen Kommission formulierten Ziele der Verkehrssicherheitsarbeit (Reduzierung der Zahl der Getöteten um 50 % bis zum Jahre 2010 gegenüber 2001) implementiert, d. h. mit besonderem Nachdruck am Markt verbreitet werden sollten, wurde von der Europäischen Kommission im Rahmen ihrer eSafety-Initiative eine Expertengruppe (eSafety Working Group Implementation Road Map) eingesetzt und mit der Ausarbeitung einer „Prioritätenliste" beauftragt [27]. Das Ergebnis der Aktivitäten dieser Arbeitsgruppe ist in

Tabelle 3-1: Prioritätenliste für eine effiziente Reduzierung der Zahl der Verkehrstoten

Fahrzeugautonome Systeme	Infrastrukturgestützte Systeme
♦ ESP (Electronic Stability Program)	♦ eCall (automatisches Notrufsystem)
♦ Blind spot monitoring	♦ Extended environmental information (Extended FCD)
♦ Adaptives Abblendlicht (Adaptive head lights)	♦ RTTI (Real-time Travel and Traffic Information)
♦ Hindernis- & Kollisionswarnung (Obstacle & collision warning)	♦ Dynamic traffic management
♦ Lane departure warning	♦ Lokale Gefahrenwarnung (Local danger warning)
	♦ Speed Alert

Tabelle 3-1 zusammengefasst. Die hier dargestellte Auflistung beruht auf Experteneinschätzungen, die auf der Grundlage von Forschungsergebnissen (insbesondere Unfalldatenanalysen) vorgenommen wurden und unter Zugrundelegung vornehmlich von Kosten-Nutzen-Kriterien die Systeme benennt, deren rasche Implementierung die effizienteste Reduzierung der Zahl der Verkehrstoten bis zum Jahr 2010 bzw. 2020 erwarten lässt.

3.3 Bewertung von Fahrerassistenzsystemen vor dem Hintergrund von Ratings und gesetzlichen Vorschriften

Die Anforderungen an die Sicherheit von Fahrzeugen, die sich in den Lastenheften für die Entwicklung neuer Fahrzeuge widerspiegeln, lassen sich in folgende drei Kategorien einteilen:

- Anforderungen aufgrund von Typzulassungsbestimmungen,
- Anforderungen der Verbraucherorganisationen und
- herstellerinterne Anforderungen.

Diese werden im vorliegenden Abschnitt knapp skizziert, der mit einem Ausblick auf denkbare Weiterentwicklungen in der Zukunft abschließt.

3.3.1 Typzulassungsbestimmungen

Die Genehmigung von Fahrzeugtypen und -bauteilen erfolgt heute nahezu ausschließlich auf internationaler Ebene über EU-Richtlinien, entworfen von der Europäischen Kommission in Brüssel [12], oder über UN-ECE-Regelungen, erstellt von der UN-Wirtschaftskommission für Europa (UN-ECE) in Genf [13].

Welche Rolle die Typzulassungsbestimmungen bei der Einführung von neuen Fahrerassistenzsystemen (FAS) spielen, hängt davon ab, ob die Funktionen eines FAS in einen von der Typzulassung geregelten Bereich fallen oder nicht. Beispielsweise gibt es im Bereich der Lichttechnik eine Vielzahl von Anforderungen, die bei der Typzulassung einzuhalten sind, sodass innovative Lichtsysteme meist erst dann (ohne Ausnahmegenehmigung) zugelassen werden können, wenn die entsprechenden zulassungsrechtlichen Randbedingungen entsprechend angepasst worden sind. Andere FAS können ohne weiteres eingeführt werden, weil deren Funktionen nicht in den von den Typzulassungsbestimmungen geregelten Bereich fallen.

Damit elektronisch gesteuerte Assistenzsysteme zugelassen werden können, die in sicherheitsrelevante und durch die Typzulassungsbestimmungen geregelte Fahrzeugkomponenten und -funktionen eingreifen, wurde bei den Vorschriften zur Fahrzeugbremse und zur Lenkanlage ein neuer Weg eingeschlagen. In Anhang 8 der UN-ECE-Regelung 13H (Bremse) und in Anhang 6 der UN-ECE-Regelung 79 (Lenkanlage) wurden eher generische Anforderungen anstelle reiner „Performance-Anforderungen“ zu Sicherheitsaspekten definiert, die von komplexen elektronischen Fahrzeugsteuerungssystemen im Rahmen der Typzulassung einzuhalten sind. Hierdurch wird beispielsweise ermöglicht, das Fahrzeugbremssystem für Funktionen der Fahrerassistenzsysteme ESP, ACC oder Brems- und Notbremsassistent zu nutzen.

Das Vorschreiben von neuen sicherheitsfördernden Fahrzeugsystemen und Ausstattungsmerkmalen auf dem Weg der Typzulassung ist häufig aufgrund der notwendigen nationalen und internationalen Abstimmungsprozesse, insbesondere im Vergleich zur schnell voranschreitenden technischen Entwicklung neuer FAS, langwierig. Nach der Einführung entsprechender Vorschriften kann aber über die Typzulassungsbestimmungen das Sicherheitsniveau nahezu aller neuen Fahrzeuge beeinflusst werden.

3.3.2 Anforderungen der Verbraucherorganisationen

Der Gesetzgeber definiert mit den Anforderungen der Typzulassung lediglich Mindeststandards, die erfüllt werden müssen, um mit einem neuen Fahrzeugmodell den Zugang zum Markt zu erhalten. Entsprechend müssen alle in den Markt gebrachten Neufahrzeuge die gesetzlichen Anforderungen erfüllen. Diese Zulassungstests sagen jedoch zunächst nichts über die Unterschiede der Sicherheitsniveaus verschiedener zugelassener Fahrzeugmodelle aus, die den Zugang zum Markt durch Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen erlangt haben. An diesem Punkt setzt die Aufgabe der Verbraucherorganisationen an. Durch eigene (Crash-)Tests soll das unterschiedliche Sicherheitsniveau der zugelassenen Fahrzeugmodelle herausgefunden und als Verbraucherinformation differenziert veröffentlicht werden. Anhand dieser Zielsetzung der Verbraucherorganisationen wird deutlich, dass es wenig Sinn machen würde, wenn bei einem Verbraucherschutztest lediglich die Typ-

zulassungstests mit ihren Anforderungen wiederholt würden. Das wenig differenzierende Ergebnis eines solchen Ansatzes für die zugelassenen Testfahrzeuge wäre die Bewertung „Test bestanden". Eine brauchbare Differenzierung der zugelassenen Produkte hinsichtlich ihrer Sicherheit wird hingegen häufig dadurch ermöglicht, dass sowohl die Testbedingungen als auch die Bewertungskriterien verglichen mit dem Zulassungstest verschärft werden. Ferner muss ein Verbrauchertest eine graduelle Differenzierung der Produkte ermöglichen, während der Zulassungstest lediglich eine binäre Differenzierung in „bestanden" oder „nicht bestanden" erlaubt.

Beim European New Car Assessment Programme (Euro NCAP) [14] wird die graduelle Differenzierung der Testergebnisse dadurch erreicht, dass eine obere und untere „Performance-Grenze" vorliegt und die Bewertung zwischen diesen Grenzen mittels einer linearen Interpolation („sliding scale") auf der Basis des Testergebnisses errechnet wird.

3.3.3 Herstellerinterne Anforderungen

Herstellerinterne Anforderungen an die Sicherheit eines Fahrzeugs beinhalten immer die Anforderungen der Typzulassung der entsprechenden Region, in der das Fahrzeug verkauft werden soll, und häufig auch ausgewählte Anforderungen, die aus dem Bereich der Verbrauchertests bekannt sind. Darüber hinaus verfügen aber viele Automobilhersteller auch über eigene hausinterne Sicherheitsstandards, die über die Anforderungen der Typzulassung und der Verbrauchertests hinausgehen und zum Teil auch weitergehende oder andere Aspekte der Fahrzeugsicherheit betreffen. Diese zusätzlichen herstellerinternen Anforderungen beruhen u. a. auf der eigenen Einschätzung hinsichtlich der Produkthaftung, den vermuteten Kundenwünschen und somit der Marktstrategie oder auch der Erkenntnisse aus der eigenen Unfallforschung.

Die Anforderungen an die Sicherheit von Fahrzeugen, die vom Gesetzgeber und von Verbraucherorganisationen aufgestellt werden, waren und sind eine treibende Kraft für viele Innovationen in der Fahrzeugtechnik. Beispielsweise sind in jüngster Vergangenheit viele technische Innovationen zum Fußgängerschutz auf die entsprechenden neuen Anforderungen in der europäischen Gesetzgebung zurückzuführen. Dieses Beispiel zeigt jedoch auch, dass sich die Anforderungen des Gesetzgebers und der Verbraucherorganisationen traditionell maßgeblich auf den Bereich der Passiven Fahrzeugsicherheit beziehen. Innovationen im Bereich der Aktiven Sicherheit und der FAS, wie beispielsweise ESP, das nachweislich einen sehr großen Sicherheitsgewinn im realen Unfallgeschehen darstellt, sind aufgrund der Kreativität und Leistungsfähigkeit der Automobil- und Zulieferindustrie entstanden – wenn auch in diesem Beispiel die Verbraucherinformation zu einer sehr schnellen Verbreitung des ESP-Systems in fast allen Fahrzeugklassen geführt hat.

Zukünftig werden jedoch viele bedeutsame Innovationen zur Steigerung der Sicherheit im Straßenverkehr in den Bereichen der Aktiven und Integrierten Sicherheit und im Bereich der FAS entwickelt werden, die häufig nur sehr eingeschränkt gesetzlich geregelt sind und die in Verbraucherschutztests bisher auch nur rudimentär und teilweise nur subjektiv getestet und bewertet werden können. Diese Erkenntnis stellt sowohl den Gesetzgeber als auch die Verbraucherschutzorganisationen vor eine neue Herausforderung.

3.3.4 Beyond NCAP – Die zukünftige Euro NCAP-Bewertung

Viele maßgebliche Innovationen im Bereich der Passiven Sicherheit sind deshalb in den Markt gekommen, weil entsprechende Prüfverfahren und Bewertungskriterien, die als Basis für gesetzliche Vorschriften oder für die Bewertung in Verbraucherschutztests dienen, die Entwicklung begünstigt oder sogar vorangetrieben haben. Im Gegensatz dazu werden viele Sicherheitssysteme im Bereich der Aktiven und Integrierten Sicherheit und im Bereich der FAS allein durch die Kreativität der Ingenieure in der Automobil- und Zulieferindustrie – auch mit der Hoffnung, diese vermarkten zu können – entwickelt. Viele Experten schätzen, dass gerade in diesen Bereichen die größten Potenziale zur weiteren Hebung der Verkehrssicherheit liegen, und dass sich dieser Bereich sehr dynamisch entwickeln wird.

Vor diesem Hintergrund, und weil Euro NCAP auch zukünftig eine maßgebliche Kraft bei der Bewertung von sicherheitsrelevanten Fahrzeugsystemen sein möchte, hat Euro NCAP die Entwicklung einer völlig neuen Herangehensweise bei der Erstellung neuer Testverfahren und Bewertungskriterien für Systeme eingeleitet, die im Bereich der Aktiven und Integrierten Sicherheit und im Bereich der FAS anzusiedeln sind [15]. Diese Aktivität wird bei Euro NCAP mit dem Begriff „Beyond NCAP" umschrieben. Ein mögliches Bewertungsverfahren im Sinne des Beyond NCAP-Gedankens könnte die bekannten Crashtest-Bewertungsverfahren ergän-

zen und somit zusätzlich genutzt werden. Ziel der Entwicklung einer Beyond NCAP-Bewertungsmethode ist es, ein flexibles, transparentes und berechenbares Verfahren zu definieren, das in der Lage ist, Innovationen der Fahrzeugsicherheit möglichst schon kurz nach der Markteinführung mit einer Sicherheitsbeurteilung auszuzeichnen.

Beim bisherigen Vorgehen zur Erstellung neuer Bewertungsbereiche hat Euro NCAP sowohl das Bewertungsverfahren spezifiziert als auch die Bewertung selbst durchgeführt (siehe **Bild 3-2**, links). Der Fahrzeughersteller hat „lediglich" eine technische Lösung angeboten, die dann – wenn sie bei Euro NCAP positiv bewertet wurde und das Bewertungsverfahren korrekt entwickelt war – auch einen Nutzen im realen Unfallgeschehen gezeigt hat. Dem Beyond NCAP-Gedanken nach soll nun der Fahrzeughersteller nicht nur ein neues Sicherheitssystem entwickeln und auf den Markt bringen. Der Hersteller soll vielmehr auch wissenschaftlich abgesicherte Daten liefern, mit denen er den zu erwartenden Nutzen im realen Unfallgeschehen aufzeigt sowie ein Testverfahren vorschlagen, mit dem das neue Sicherheitssystem geprüft und bewertet werden kann. Euro NCAP übernimmt in diesem Fall lediglich die Rolle, alle gelieferten Informationen zu verifizieren (siehe **Bild 3-2**, rechts) und auf dieser Basis ein Rating durchzuführen.

Durch eine robuste Beyond NCAP-Bewertungsmethode, die das existierende Euro NCAP-Bewertungsverfahren ergänzt, könnten neue Sicherheitssysteme schneller bewertet und durch ein unabhängiges Qualitätssiegel besser vermarktet werden. Für eine funktionierende Beyond NCAP-Methode ist jedoch vertrauensvoller und partnerschaftlicher Umgang von Euro NCAP und Industrie die grundlegende Voraussetzung.

3.4 Rechtliche Grenzen autonom eingreifender Fahrerassistenzsysteme

Bei Erteilung der EG-Typgenehmigung werden Fahrzeuge hinsichtlich ihrer Übereinstimmung mit fahrzeugtechnischen Vorschriften überprüft. In den ECE-Regelungen sind dabei für Fahrerassistenzsysteme keine Bauvorschriften enthalten. Zur Anwendung auf Fahrerassistenzsysteme kommen die fahrzeugtechnischen Vorschriften dennoch: Einzelne Gesichtspunkte – wie die elektromagnetische Verträglichkeit – sind nämlich unmittelbar auf Fahrerassistenzsysteme als Bauteile des Fahrzeugs anwendbar. Darüber hinaus ist die Zulässigkeit von teilautomatisch wirkenden Fahrerassistenzsystemen auch Gegenstand einzelner fahrzeugtechnischer Regelungen. Als Beispiel für eine Regelung von Fahrerassistenzsystemen in fahrzeugtechnischen Vorschriften lässt sich die ECE-R 79 anführen, worin „einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Lenkanlage" geregelt sind. Es wird darin die Variante einer „Fahrerassistenz-Lenkanlage", deren Merkmal u. a. jederzeitige Übersteuerbarkeit ist, unter bestimmten technischen Voraussetzungen als zulässig eingestuft. Insgesamt ist aber festzustellen, dass die fahrzeugtechnischen Vorschriften Fahrerassistenzsysteme nur teilweise abdecken.

Dagegen ist der Straßenverkehr ein insgesamt durch verschiedene Rechtsnormen umfassend geregelter Bereich menschlichen Handelns [17]. Fahrerassistenzsysteme weisen einen Bezug zur Fahraufgabe auf, sodass sich Anforderungen auch aus den (verhaltensrechtlichen) Anforderungen der Straßenverkehrsordnung (StVO) und sonstiger Regelungen des Straßenverkehrsrechts ergeben. So muss

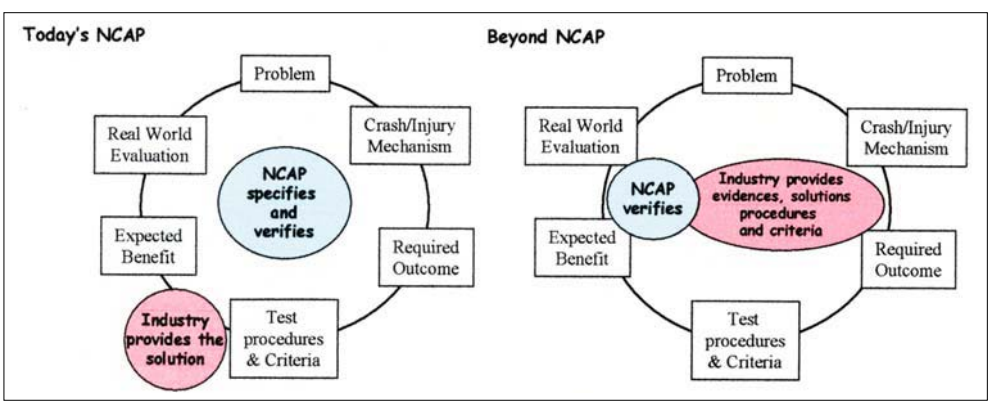


Bild 3-2: Vergleich der heutigen und der zukünftigen NCAP-Bewertungsmethode

sichergestellt sein, dass Assistenzfunktionen nicht in Widerspruch zu diesen Vorgaben stehen und dem Fahrer ermöglichen, seinen verhaltensrechtlichen Pflichten nachzukommen [22].

Entscheidende Bedeutung erlangt in diesem Zusammenhang das Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr von 1968 (WÜ-StV) [24]. Dieser völkerrechtliche Vertrag ist Ausgangspunkt zahlreicher nationaler Vorschriften im Bereich des Straßenverkehrsrechts [19]. Unterzeichnet wurde das Übereinkommen von den meisten europäischen Mitgliedstaaten, aber auch von anderen Staaten weltweit. Es verpflichtet die Vertragsstaaten, nationale Vorschriften im Bereich des Straßenverkehrs im Einklang mit den völkerrechtlichen Vorgaben auszugestalten [20]. Die Einhaltung des Übereinkommens ist im Interesse der Zulassung zum internationalen, grenzüberschreitenden Verkehr durch Art. 3 Abs. 3 WÜ-StV geboten [23], [17], [18], [16]. Mit Blick auf Fahrerassistenzsysteme sind folgende – auszugsweise zitierte – Vorschriften des Übereinkommens von Bedeutung [17]:

Artikel 1 lit. v) WÜ-StV:
‘„Führer“ ist jede Person, die ein Kraftfahrzeug oder ein anderes Fahrzeug (Fahrräder eingeschlossen) lenkt […].‘

Artikel 8 Abs. 1 WÜ-StV:
‘Jedes Fahrzeug und miteinander verbundene Fahrzeuge müssen, wenn sie in Bewegung sind, einen Führer haben.‘

Artikel 8 Abs. 5 WÜ-StV:
‘Jeder Führer muss dauernd sein Fahrzeug beherrschen oder seine Tiere führen können.‘

Artikel 13 Abs. 1 WÜ-StV:
‘Jeder Fahrzeugführer muss unter allen Umständen sein Fahrzeug beherrschen, um den Sorgfaltspflichten genügen zu können und um ständig in der Lage zu sein, alle ihm obliegenden Fahrbewegungen auszuführen. […]‘

Es wird vereinzelt vertreten, dass Art. 8 u. 13 WÜ-StV keine Regelung der zulassungsrechtlichen Frage treffen [16], [23]. Diese Argumentation beruht darauf, dass die Art. 8 u. 13 WÜ-StV im zweiten Kapitel des Übereinkommens stehen, das sich mit „Verkehrsregeln“, also verhaltensrechtlichen Normen, die sich an den Fahrer im Straßenverkehr richten, befasst. Dagegen sind Vorschriften über die Bauart von Fahrzeugen im dritten Kapitel des Übereinkommens niedergelegt. Dieses enthält unbestritten keine Vorschriften, die einen Bezug zu Fahrerassistenzsystemen aufweisen, auch wird nicht auf die verhaltensrechtlichen Vorschriften des zweiten Kapitels verwiesen. Die Vertreter dieser Rechtsansicht unterscheiden daher strikt zwischen Verhaltens- und Zulassungsvorschriften, was formaljuristisch und aus logischen Gründen geboten sei: „Die Art des Umgangs, hier die Verhaltenspflicht im Umgang mit dem Fahrzeug, hängt von dessen technischer Ausstattung ab. Dies muss so sein, da nur dann etwas benutzbar ist, wenn es bereits existiert. Art. 8, 13 WÜ-StV sind daher nicht für die Anforderungen an die Bauart eines Kraftfahrzeuges einschlägig [16].“

Demgegenüber wird hervorgehoben, dass ein Wertungsunterschied zwischen Zulassungs- und Verhaltensrecht zu dem absurden Ergebnis führen würde, dass Fahrzeuge mit Fahrerassistenzsystemen zugelassen werden könnten, mit denen die Fahrer ihren verhaltensrechtlichen Pflichten nicht nachkommen können [18]. Auch sei ein besonderer Verweis auf die verhaltensrechtlichen Anforderungen im dritten Kapitel des Übereinkommens entbehrlich, da selbstverständlich davon ausgegangen wurde, dass ein (menschlicher) Fahrer das Fahrzeug beherrschen kann. Ist dies nicht der Fall, würde nämlich gleichwohl gegen das Wiener Übereinkommen verstoßen (wenngleich nicht gegen Bauvorschriften, sondern bei der Benutzung gegen Verhaltensrecht). Die verhaltensrechtlichen Vorschriften losgelöst von den im Übereinkommen geregelten (Mindest-)Bauvorschriften des dritten Kapitels zu betrachten, ist daher nicht zielführend: Der Vertragszweck, die Gewährleistung eines ungehinderten internationalen Verkehrs zwischen den Vertragsstaaten, wird im Fall eines Verstoßes gefährdet, da ein anderer Vertragsstaat entsprechend ausgestattete Fahrzeuge – trotz Zulassung im Heimatstaat – vom internationalen Verkehr ausschließen könnte [17]. Der Wortlaut ist weiterhin so zu verstehen, dass Fahrerassistenzsysteme, die eine umfassende und jederzeitige Beherrschbarkeit durch den Fahrer nicht gewährleisten, dazu führen, dass entgegen Art. 8 Abs. 1 WÜ-StV zwei Fahrzeugführer mit Einfluss auf die Fahrbewegung vorhanden wären: neben dem Fahrer einer oder mehrere andere Systemgestalter oder Systembetreiber [21]. Nimmt das Assistenzsystem darüber hinaus eine Geschwindigkeitsbeeinflussung vor, ist zudem die umfassende Beherrschung der Fahrgeschwindigkeit und damit Art. 13 Abs. 1 WÜ-StV beeinträchtigt. Festzuhalten bleibt daher, dass – was sich auch aus Art. 1 lit. v) WÜ-StV ergibt – ein Fahrer die Fahrzeugbewegung bestimmen muss, nicht ein System [17].

Es kann auch nicht argumentiert werden, dass der historische Wille der Vertragsparteien überhaupt keine Fahrerassistenzsysteme zum Gegenstand gehabt haben kann, weil Fahrerassistenzsysteme

zurzeit des Vertragsschlusses gänzlich unbekannt waren. Entscheidend ist nämlich die so und nicht anders getroffene Regelung, dass ein Mensch das Fahrzeug beherrschen soll und für alles verantwortlich ist, was mit dem Fahrzeug geschieht. Da diese Regelung weiterhin Bestand hat, kann hiervon ohne Änderung nicht abgewichen werden.

Entscheidendes Kriterium ist deshalb, dass der Fahrer sein Fahrzeug stets „beherrscht". Völkerrechtlich verbindlich ist dabei aber nicht die deutsche Übersetzung des Übereinkommens, dies sind nur die (gleichermaßen) verbindlichen Vertragssprachen (Französisch, Englisch, Russisch, Chinesisch, Spanisch). Wird eine entsprechende Wortlautauslegung des Wiener Übereinkommens über den Straßenverkehr vorgenommen, zeigt sich, dass die deutsche Übersetzung des Vertragstextes mit „beherrschen" jedenfalls den Wortlaut der drei erstgenannten Sprachen zutreffend wiedergibt und daher zum Maßstab gemacht werden kann [22].

„Beherrschen" bedeutet ein eigenbestimmtes Verfügen über eine Sache oder einen Geschehensablauf [18]. Dies führt dazu, dass jedes System, das in die Fahrzeugbewegung eingreift, ohne jederzeit übersteuerbar zu sein, mit einer vollständigen Beherrschung des Fahrzeugs durch den Fahrer nicht vereinbar ist.

Die Übersteuerbarkeit fehlt jedoch auch bei (zulässigen) Systemen, die in Situationen eingreifen, die der Fahrer nicht zeitgerecht beherrschen kann. Die Regelung stimmt hier aber mit dem Fahrerwillen überein. Als Beispiel lässt sich das elektronische Stabilitätsprogramm anführen: Eine Übersteuerung ist aus tatsächlichen Gründen beim Eingriff nicht mehr möglich. Zulässig ist das System aber deshalb, weil der Eingriff dem Fahrerwillen, vorgegeben durch den eingeschlagenen Lenkwinkel, insoweit physikalisch möglich umsetzt, wenn es in der zeitkritischen Situation eingreift [18]. Tatsächlich hat man es hier also nicht mit einer Ausnahme zu tun, sondern mit einer besonderen technischen Ausgestaltung, die sicherstellt, dass die vorgenommene Regelung stets mit dem Fahrerwillen übereinstimmt. Dies verlangt das Wiener Übereinkommen: Ein „eigenbestimmtes Verfügen", also Beherrschung durch den Fahrer.

Mitunter wird ausgeführt, dass beim Antiblockiersystem („ABS") der Fahrer bereits nicht mehr auf alles Einfluss habe. Tatsächlich handelt es sich bei diesem System jedoch um eine bloße Funktionsoptimierung; der Fahrerwille wird hier besonders effektiv umgesetzt [17]. Die volle Fahrzeugbeherrschung wird dadurch nicht in Frage gestellt, sodass es einer Würdigung der Zulässigkeit nach den Grundsätzen des Wiener Übereinkommens erst gar nicht bedarf. Ähnlich liegt der Fall bei Systemen, die einer gewöhnlichen Fahrzeugeigenschaft entsprechen, wie dies beim Geschwindigkeitsbegrenzer der Fall ist: Zwar ist die eingestellte Geschwindigkeit nicht übersteuerbar, doch entspricht das Verhalten einer normalen Fahrzeugeigenschaft, auf die sich der Fahrer genauso einstellen kann wie auf die bauartbedingte Höchstgeschwindigkeit, also eine normale Leistungsgrenze des Fahrzeugs. Ein Eingriff in die Fahrerautonomie liegt damit nicht vor [18].

Zusammenfassend bleibt daher festzuhalten, dass jeder nicht übersteuerbare Eingriff in fahrzeugführungsrelevante Funktionen des Fahrzeugs die Fahrzeugbeherrschung auszuschließen geeignet ist – auch wenn dies nur für kurze zeitliche Abschnitte erfolgt. Dem Wortlaut des Wiener Übereinkommens über den Straßenverkehr von 1968 zufolge sind solche Eingriffe unzulässig [17], [18], [21]. Die volle und jederzeitige Übersteuerbarkeit gehört deshalb zu den rechtlichen Rahmenbedingungen, die bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen zu prüfen und – um Fehlinvestitionen zu vermeiden [17] – unbedingt einzuhalten sind.

Quellenverzeichnis

[1] *Brown, I. D.*: Review of the ‚Looked-but-Failed-to-See' Accident Causation Factor. Road Safety Research Report No. 60, Department for Transport, London, 2005

[2] *Elvik, R.; Vaa, T.*: The handbook of road safety measures. Amsterdam, Elsevier, 2004

[3] *Fuller, R.*: Towards a general theory of driver behaviour. Acc. Anal. & Prev., 37, 2005, S. 461–472

[4] OECD: Behavioural adaptations to changes in the road transport system. Paris: OECD, 1990

[5] *Treat, J. R.*: Tri-level study of the causes of traffic accidents: An overview of final results. Proceedings of the 21st Annual Conference of the American Association of Automotive Medicine/National Highway Safety Administration/Insurance Institute for Highway Safety, September 15 – 17, 1977, Illinois, USA

[6] *Reason, J.*: Human Error. New York, Cambridge University Press, 1990

[7] *Salmon, P. M.; Regan, M. A.; Johnston, I.*: Human Error and Road Transport: Phase One – A framework for an error tolerant road transport system. Report Nr. 256, Monash University Accident Research Centre, Victoria, Australia, 2005

[8] *Weller, G.; Schlag, B.*: Verhaltensadaptation nach Einführung von Fahrerassistenzsystemen. In: *Schlag, B.* (Hrsg.): Verkehrspsychologie: Mobilität – Sicherheit – Fahrerassistenz. Lengerich u. a., Pabst Science Publishers, S. 351–370, 2004

[9] *Vaa, T.; Gelau, C.; Penttinen, M.; Spyroupoulou, Y.*: ITS effects on road traffic accidents – State-of-the art. Proceedings of the 13th Ist World Congress, London, October 8 – 12, 2006, Paper 1368
[10] *Vollrath, M.; Briest, S.; Schießl, C.; Drewes, J.; Becker, U.*: Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme aus Sicht der Verkehrssicherheit. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft F 60, Bremerhaven, Wirtschaftsverlag NW, 2006
[11] *Wilde, G. J. S.*: Risk homeostasis theory and traffic accidents: propositions, deductions and discussion of dissension. Ergonomics, 31, S. 441–468, 1988
[12] EG-Richtlinien http://ec.europa.eu/enterprise/automotive/index_de.htm
[13] ECE-Regelungen http://www.unece.org/trans/main/welcwp29.htm
[14] http://www.euroncap.com/home.aspx
[15] *Seeck, A.*: Die Zukunft der Fahrzeugsicherheitsbewertung für Typzulassung und Euro NCAP, 6. Internationalen VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit 2007 – Innovativer Kfz-Insassen- und Partnerschutz, Berlin, 18. – 19. Oktober 2007
[16] *Bewersdorf, C.*: Zur Vereinbarkeit von nicht-übersteuerbaren Fahrerassistenzsystemen mit dem Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr vom 8. November 1968 in NZV 2003, S. 266–271
[17] *Albrecht, F.*: Fahrerassistenzsysteme und rechtliche Rahmenbedingungen in VD 2006, S. 143–150
[18] *Albrecht, F.*: Die rechtlichen Rahmenbedingungen bei der Implementierung von Fahrerassistenzsystemen zur Geschwindigkeitsbeeinflussung in DAR 2005, S. 186–198
[19] *Trüstedt, H.*: Zur Vorgeschichte der neuen Straßenverkehrs-Ordnung. In: ZVS 17 (1971), S. 3–10
[20] *Deutschle, S.*: „Wer fährt? – Der Fahrer oder das System?“ In: SVR 2005, S. 249–254
[21] *Albrecht, F.*: „Fährt der Fahrer oder das System?“ Anmerkungen aus rechtlicher Sicht. In: SVR 2005, S. 373–376
[22] *Gasser, T. M.*: Zusammenfassung des 1. AKTIV-Workshop „rechtliche Rahmenbedingungen“ Bergisch Gladbach, 15. März 2007, verfügbar unter: http://www.aktiv-online.org/deutsch/aktuell.html
[23] *Bewersdorf, C.*: Zulassung und Haftung bei Fahrerassistenzsystemen im Straßenverkehr. Berlin, Duncker & Humblot, 2005
[24] Gesetz zu den Übereinkommen vom 8. November 1968 über den Straßenverkehr und über Straßenverkehrszeichen, zu den Europäischen Zusatzübereinkommen vom 1. Mai 1971 zu diesen Übereinkommen sowie zum Protokoll vom 1. März 1973 über Straßenmarkierungen v. 21. Sept. 1977 in BGBl. II 1977, S. 809–927
[25] *Hörauf, U.; Buschardt, B.; Donner, E.; Graab, B.; Winkle, T.*: Analyse von Verkehrsunfällen mit FAS-Potenzial, Abschätzung am Beispiel eines FAS Lane Departure Warning. Tagung aktive Sicherheit 2006. TU München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik
[26] *Gelau, C.; Bauer, A.*: What do accident data tell about drivers‘ needs for assistance? Vortrag anlässlich der „First Conference on Drivers Needs“ des EU Network of Excellence HUMANIST, Lissabon, Portugal, 03. – 04. Juni 2004
[27] *Kulmala, R.; Mäuerer, H.-J.* (eds.): Final Report and Recommendations of the Implementation Road Map Working Group. eSafety Forum, Brussels, 18 October 2005. http://www.esafetysupport.org/download/working_groups/Final_Report_181005.pdf
[28] *Kulmala, R.*: How can intelligent vehicle safety systems be implemented. Manuskript vom 05.07.2006. Im Internet verfügbar unter: http://www.esafetysupport.org/en/esafety_activities/esafety_working_groups/implementation_road_map.htm

4 Nutzergerechte Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion von Fahrerassistenzsystemen

Winfried König

4.1 Übersicht

Durch langjährige Forschungen bei Kfz-Herstellern, Zulieferfirmen und an Hochschulen sind umfangreiche, aber dennoch lückenhafte Erkenntnisse über das Zusammenspiel zwischen FAS und Nutzer gewonnen worden. In deutschen und internationalen Projekten wie z. B. PROMETHEUS, DRIVE, MOTIV, INVENT, RESPONSE und AKTIV haben sich Kfz-Hersteller, Zulieferfirmen, Hochschulen und weitere staatliche und private Forschungseinrichtungen zusammengefunden, um die vorwettbewerbliche Forschung für derartige Systeme voranzutreiben. Im folgenden Kapitel sollen einige der gewonnenen Kenntnisse dargelegt werden, um die Entwicklung des HMI von FAS zu erleichtern.

Im ersten Abschnitt soll das Zusammenspiel Mensch-Fahrzeug-Umwelt prinzipiell erläutert und die Bereiche erwähnt werden, bei denen eine Unterstützung des Fahrers sinnvoll erscheint. Im zweiten Abschnitt wird auf einige Probleme eingegangen, die in unterschiedlicher Form und Intensität bei allen FAS auftreten und die deshalb gemeinsam betrachtet werden können. Ein bewährter Weg in der Entwicklung von FAS und die Einbettung der HMI-Fragen werden im dritten Abschnitt dargestellt. Im letzten Abschnitt wird auf die Bewertung der HMI von bereits realisierten und geplanten FAS eingegangen.

4.2 Fragestellungen bei der Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion (HMI) von FAS

Der Fahrer, das Fahrzeug mit Fahrerassistenzsystemen und die Umgebung des Fahrzeugs wirken in Raum und Zeit eng zusammen. Deshalb können diese Systeme nicht allein aus technischer Sicht gestaltet werden, vielmehr sind die Gewohnheiten, die Fähigkeiten, aber auch die Defizite der Fahrer neben anderen Faktoren zu betrachten. Nur dann sind eine Verbesserung der Sicherheit, des Komforts und letztendlich die Bereitschaft zum Kauf dieser Systeme zu erreichen.

4.2.1 Unterstützung durch FAS

Fahrerassistenzsysteme können auf allen Ebenen der Fahrzeugführung – Stabilisierung, Bahnführung, Navigation und Nebentätigkeiten – unterstützen und unterschiedliche Teilaufgaben des Nutzers übernehmen. Ihr Beitrag kann vom einfachen Informieren, der Analyse einer Situation, ihrer Bewertung, über die Auswahl einer Aktion bis hin zur selbsttätigen Durchführung dieser Aktion reichen. Dabei muss sichergestellt werden, dass der Fahrer immer Herr der Situation bleiben kann. Im Detail ist ebenfalls zu klären, bei wem die Verantwortung im Einzelfall liegt. Als Basis derartiger Überlegungen ist, wie im folgenden Kapitel erläutert, die „Vienna Convention on Road Traffic“ [1] zu beachten.

Um den Bedarf und die Möglichkeiten einer Unterstützung des Fahrers zu erforschen, sind fundierte Kenntnisse über das Verhalten von Fahrern im Straßenverkehr in unterschiedlichsten Fahrsituationen notwendig. Dies betrifft den Extremfall des Unfalls, aber auch das „normale“ Fahren, bei dem die Fahrer sich bedingt auch außerhalb der Straßenverkehrsordnung bewegen, sich umfangreichen Nebentätigkeiten zuwenden und schwierige Verkehrsituationen dennoch meist erfolgreich meistern. Der Ablauf und das Fahrerverhalten bei Unfällen wird in Deutschland in der Datenbank GIDAS (German in-depth accident study) [2] erfasst, in der Datensätze von mehr als 6000 Unfällen abgelegt sind. Über das „normale Fahren“ gibt es noch geringere Kenntnisse; erste Projekte zum Sammeln derartiger Daten sind in den USA abgeschlossen und werden in Europa vorbereitet.

4.2.2 Leistungen und Grenzen der FAS

Bei der Gestaltung eines FAS müssen die relevanten Parameter von Fahrer, Fahrzeug und Umfeld für die jeweiligen Funktionen des FAS identifiziert, quantifiziert und beschrieben werden. Es muss klar festgehalten werden, welche Leistungen das FAS in welcher Situation erbringen kann und wo seine Grenzen liegen. Das Kennen und Verinnerlichen dieser Grenzen ist wesentlicher Bestandteil des Vorgangs, bei dem der Fahrer das FAS „erlernt“.

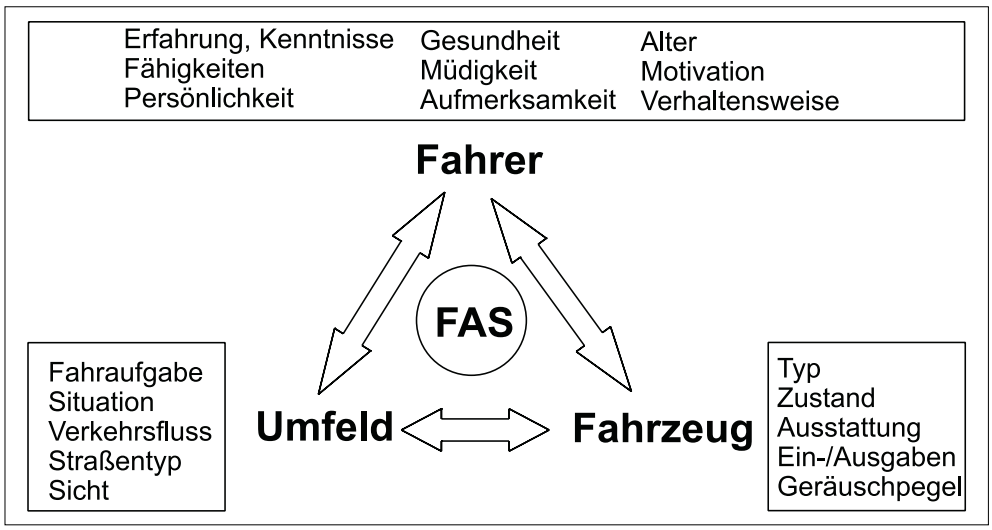


Bild 4-1: Zusammenwirken von Fahrer, Fahrzeug mit FAS und Umfeld

4.2.3 Benötigte Kompetenzen und Fachbereiche

Bei der kompetenten und verantwortungsbewussten Entwicklung des HMI eines FAS müssen neben dem Fachwissen und den Methoden des Ingenieurs auch sozialwissenschaftliche Methoden und Erkenntnisse eingesetzt werden, um die Bedürfnisse und das Verhalten des Fahrers angemessen einbeziehen zu können. Deshalb hat es sich bewährt, die Entwicklung in einem interdisziplinären Team („Human Engineering Team") durchzuführen, in dem neben Ingenieuren zumindest Psychologen permanent vertreten sein sollten. Weitere spezielle Fachkompetenz muss fallweise eingebunden werden.

4.2.4 Einflussfaktoren bei der Entwicklung von FAS

Neben den einzelnen Funktionen eines FAS, die systematisch und umfassend beschrieben sein müssen, sind weitere Einflussfaktoren zu betrachten: Eine bestimmte Funktion ist unterschiedlich zu gestalten, je nachdem, ob ihre Nutzung durch den Fahrer ausschließlich im Stand oder auch während der Fahrt vorgesehen ist. Die Gefahren einer Abwendung der Aufmerksamkeit und die Forderung nach Unterbrechbarkeit des Dialogs zwischen Fahrer und FAS seien hier erwähnt. Auch das breite Spektrum der Fähigkeiten unterschiedlicher Nutzergruppen ist von Belang. Physiologische und kognitive Defizite älterer Fahrer, geringe Antizipation von Risikosituationen und erhöhte Risikobereitschaft jüngerer Fahrer können als Beispiele dienen. Nationale und internationale Vorschriften, Richtlinien und Normen müssen berücksichtigt werden, da sie z. B. Mindestforderungen an die Gebrauchstauglichkeit stellen. Auch ein Mindestmaß an Harmonisierung ist notwendig, sodass Fahrer grundlegende Funktionen ohne hohen Lernaufwand nutzen können. Dagegen abzuwägen ist der Wunsch des Wettbewerbers, sich auf dem Markt durch eine markante, „innovative" Gestaltung zu platzieren.

4.2.5 Interaktionskanäle zwischen Fahrer, FAS und Fahrzeug

Der Mensch erkennt seine Umwelt überwiegend mit Hilfe des Sehsinns. Andere Verkehrsteilnehmer, ihre Position, ihr vermutetes Verhalten, die Fahrspur und der Fahrstreifen, aber auch Objekte im Straßenraum werden mit dem Sehapparat und der dahinter liegenden höchst leistungsfähigen Bildverarbeitung des Menschen entdeckt, ausgewählt und von weiteren Strukturen im Gehirn hinsichtlich ihrer Relevanz und Weiterentwicklung bewertet. Auch die Infrastruktur im Straßenverkehr ist für den Sehsinn ausgelegt: Verkehrsschilder vermitteln Regeln, Markierungen grenzen Fahrstreifen voneinander ab, Blinker zeigen eine Fahrtrichtungsänderung an, Bremslichter warnen vor verzögernden Fahrzeugen. Somit ist der visuelle Kanal auch bei FAS

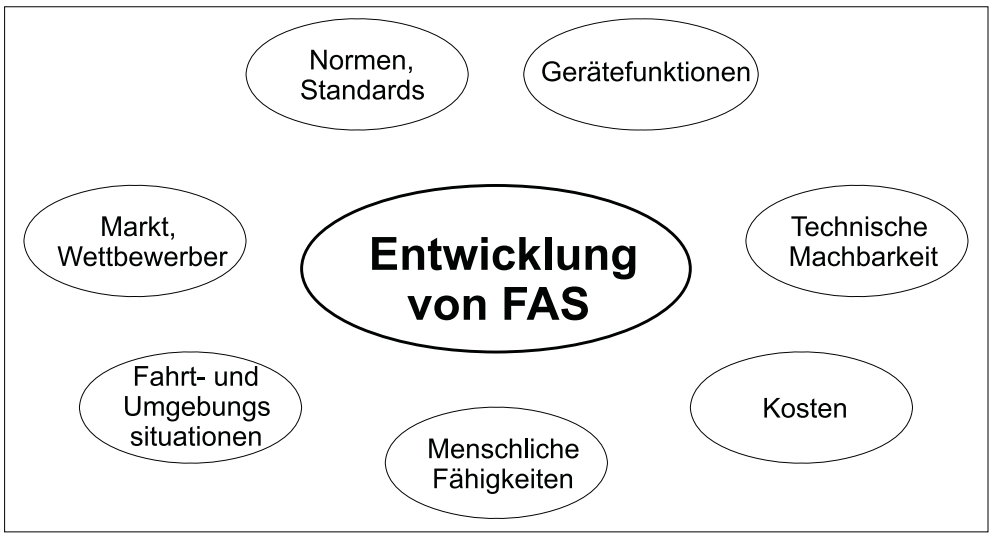


Bild 4-2: Einflussfaktoren bei der Entwicklung von FAS

von großer Bedeutung. Im sichtbaren Bereich des Spektrums, aber auch im nahen und fernen Infrarot- sowie im UV-Bereich gewinnen FAS mittels Kameras und Bildverarbeitung Information. Für die Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern, insbesondere für das Anzeigen und Signalisieren von Gefahr, wird vom Menschen und von FAS der akustische Kanal genutzt. Dazu gehört die Eingabe von Kommandos über Spracheingabesysteme sowie die Ausgabe von Warnhinweisen und Information vom FAS an den Fahrer mittels Sprachausgabe. Der haptische Kanal dient zur Eingabe von Kommandos über Hand und Fuß, in umgekehrter Richtung nutzen FAS diesen Kanal zur Rückmeldung durch Gegenkräfte an Pedalen, Lenkrad und „haptischen Stellern".

4.2.6 Änderung der Beziehung Fahrer-Fahrzeug durch FAS

Benutzt ein Fahrer ein Assistenzsystem, welches direkt in das Fahrgeschehen eingreift (z. B. ACC mit Teilübernahme der Längsführungsaufgabe oder

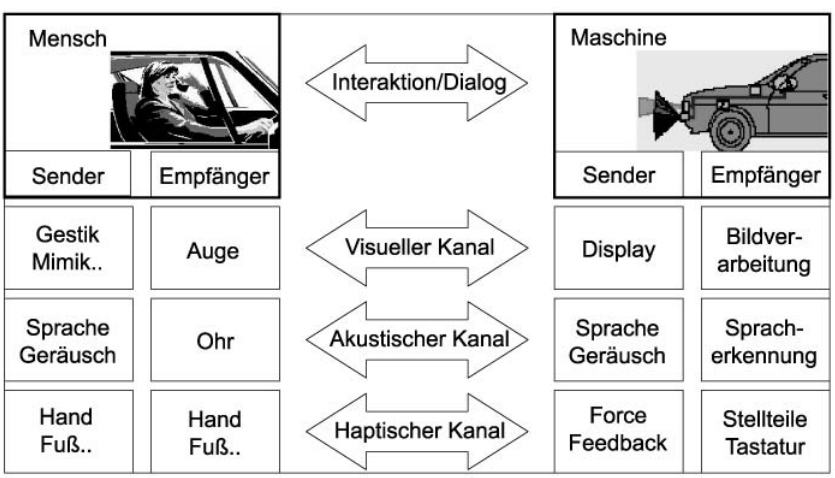


Bild 4-3: Interaktionskanäle zwischen Fahrer und FAS

eine Stop&Go-Funktion), so bedeutet dies eine fundamentale Veränderung seiner Aufgabe der Fahrzeugführung. Teile der bisherigen Fahraufgabe können an das Assistenzsystem delegiert werden; hierauf beruht der Entlastungseffekt dieser Systeme mit positiven Auswirkungen auch auf die Verkehrssicherheit. Die verbleibende Aufgabe enthält nunmehr weniger regelnde und mehr überwachende Anteile. Als schwierig kann sich für den Fahrer erweisen, dass er in unterschiedlichen Situationen, wenn das FAS an seine Funktionsgrenzen gerät, auf angemessene Weise die Funktion wieder übernehmen muss. Es besteht die Gefahr, dass der Fahrer, wenn er lange Zeit aus dem Regelkreis genommen ist, die Fertigkeit für diese Funktion verliert. Es könnte auch sein, dass sich sein Bewusstsein für die Fahrsituation verschlechtert, wenn er nicht permanent die für die Funktion wichtigen Details der Fahrsituation verfolgt.

Das Assistenzsystem zeigt ein eigenständiges Fahrverhalten, welches möglicherweise vom eigenen Fahrverhalten des Fahrers abweicht. Abhängig vom Automatisierungsgrad kann sich der Fahrer dadurch zeitweise mehr oder weniger in eine Art Beifahrersituation versetzt fühlen. Die Qualität dieses Zusammenwirkens zwischen Fahrer und Assistenzsystem bestimmt weitestgehend die Akzeptanz der Systeme.

4.2.7 Situationsbewusstsein des Fahrers

Zur Erfassung der Verkehrssituation besitzt das System Sensoren, deren Erfassungsbereiche normalerweise nicht mit denen der menschlichen Sinnesorgane übereinstimmen. Die Grenzen der Sensoren und der Signalverarbeitung sind wesentlich für die Funktionalität eines FAS. Sind diese Grenzen für den Fahrer nicht verständlich, wird es für ihn schwierig, das System wie vom Hersteller vorgesehen zu nutzen.

Auch das beabsichtigte Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer ist wichtig, um eine angemessene Strategie für das eigene Fahrverhalten in einer bestimmten Verkehrsituation zu entwickeln. Dazu gehört die Erwartung, dass sich andere Verkehrsteilnehmer meist an Regeln halten; erfahrene Fahrer sind aber auch in der Lage, nicht regelkonformes Verhalten anderer voraus zu ahnen, bevor sich hieraus eine Konfliktsituation entwickelt hat. Diese Fähigkeit kann als „Situationsbewusstsein des Fahrers“ (Situation Awareness) bezeichnet werden. Sie ist beim Autofahren insbesondere hinsichtlich der Durchführung von Nebentätigkeiten von Bedeutung. „Situationsbewusste“ Fahrer wenden sich derartigen Tätigkeiten nur zu, wenn ihre Einschätzung der Verkehrssituation dies erlaubt; sie kontrollieren deren Entwicklung durch kurze Blicke und brechen sie ab, wenn die Schwierigkeit der Situation dies verlangt. Problematisch ist es, bei der Einschätzung der Situation die richtigen Hinweise wahrzunehmen. Es hat sich gezeigt, dass durch die Kontrollblicke des Fahrers während einer Nebentätigkeit vor allem die Entwicklung dieser vorab als wichtig eingeschätzten Hinweise weiter verfolgt wird; andere werden oft ausgeblendet. Ein derartiges Situationsbewusstsein kann von technischen Systemen bisher nur sehr begrenzt entwickelt werden und entfällt deshalb bei der Planung einer angemessenen Aktion des Systems.

4.2.8 Inneres Modell

Mit zunehmender Funktionalität der Assistenzsysteme und damit zunehmender Entlastungswirkung steigt auch die Komplexität der Systeme mit der Gefahr, vom Fahrer nicht mehr verstanden zu werden. Es ist möglich, dass ein Fahrer beispielsweise die Funktionen eines Geschwindigkeitsregelungssystems verstanden hat oder diese zumindest problemlos nutzen kann. Die zusätzlichen Funktionen eines ACC-Systems und insbesondere dessen Funktionsgrenzen muss er jedoch neu erlernen. Dies gilt in gleicher Weise für die Weiterentwicklung des Systems hin zu einem ACC mit Stop&Go-Funktion und zusätzlicher Querführungsunterstützung. Es muss in jedem Fall durch Produktinformation oder andere Mittel, z. B. durch einen „Demonstrationsmode“, sichergestellt werden, dass der Fahrer ein angemessenes „inneres Modell“ der Systeme aufbauen kann. Dieses Modell muss keinesfalls ein physikalisch korrektes Abbild der Funktionsweise darstellen; es kann durchaus aus Bildern und Metaphern aus der Erfahrung des Nutzers bestehen. Entscheidend ist, dass das Modell die für ihn wichtigen Funktionen, die Meldungen und Warnungen und die Funktionsgrenzen enthält. Insbesondere bei Funktionen, die selten verwendet werden, oder Meldungen und Warnungen, die sehr selten auftreten, muss dem Fahrer Hilfestellung gegeben werden, um diese kennen zu lernen und sie in sein inneres Modell des Systems einzubauen. Insbesondere das Verhalten in Gefahrensituationen kann real nicht erlernt werden; hier sollte über den Einsatz von Simulatoren im Lernprozess nachgedacht werden.

4.2.9 Entlastung oder Belastung durch FIS und FAS?

Eine Grundregel bei der Gestaltung von Mensch-Maschine-Systemen ist es, sowohl eine Überforderung als auch eine Unterforderung des Menschen zu vermeiden. Es ist zu bedenken, dass die Interaktion des Fahrers mit dem FIS/FAS ein gewisses Maß seiner geistigen Kapazität bindet. Dies stellt prinzipiell eine Zusatzbelastung dar, die durch die entlastende Wirkung des FAS übertroffen werden soll.

In mehreren Projekten (z. B. SANTOS [3], COMUNICAR [4]) wurde versucht, die Interaktion so zu gestalten, dass die Gesamtbelastung aus der Fahraufgabe und möglichen Nebentätigkeiten des Fahrers ein bestimmtes Maß nicht überschreitet. Dazu wurden Schätzungen der Belastung durch die Verkehrskomplexität, durch Nebentätigkeiten wie z. B. Gespräche mit Beifahrern zusammengeführt mit einer Schätzung der momentanen Leistungsfähigkeit des Fahrers. Auch die Anpassung des Verhaltens eines FAS an die individuelle Leistungsfähigkeit und Präferenzen eines bestimmten Fahrers (Personalisierung) ist Gegenstand mehrerer Projekte.

Geht die Entlastung des Fahrers durch die genutzten Funktionen der FAS zu weit, besteht die Gefahr, dass dieser ermüdet. Es ist auch der Frage nachzugehen, ob er die Entlastung für irrelevante Tätigkeiten nutzt und seine Aufmerksamkeit vom Verkehrsgeschehen abzieht. Auch eine Kompensation der Entlastung durch riskanteres Fahren ist in Betracht zu ziehen und sollte im Entwicklungsprozess sorgfältig untersucht werden.

4.2.10 Verantwortung des Fahrers

Nach heutigem Stand der Diskussion in Fachkreisen ist es unumgänglich, dass der Fahrer die Verantwortung für die Fahrzeugführung auch bei Einsatz von FAS behalten muss.

Diese Forderung ist bereits in der „Vienna Convention on Road Traffic“ vom 8.11.1968 enthalten [1]. Dort heißt es in Chapter II, Article 5: „Every driver shall at all times be able to control his vehicle or to guide his animals“ sowie in Article 13: „Every driver of a vehicle shall in all circumstances have his vehicle under control so as to be able to exercise due and proper care and to be at all times in a position to perform all manoeuvres required of him”. Die Konsequenzen dieser Forderung für die Auslegung von eingreifenden FAS sind in der Fachwelt in der Diskussion. Es existiert z. B. die Meinung, dass Systeme, die vom Fahrer nicht übersteuert werden können, grundsätzlich nicht zulässig seien. Dies betrifft sowohl Notbremssysteme als auch geschwindigkeitsbegrenzende Systeme. Andere Fachleute meinen, dass die „Vienna Convention on Road Traffic“ ausreichend Spielraum biete und z. B. Notbremssysteme bei richtiger Auslegung durchaus zulassungsfähig seien. Eine Änderung der „Vienna Convention on Road Traffic“ würde aufgrund ihrer weltweiten Geltung erhebliche Anstrengungen erfordern und – zumindest teilweise – eine Verlagerung der Verantwortung vom Fahrer zum Hersteller oder Zulieferer bedeuten. Vor diesem Hintergrund sollten FAS derart gestaltet werden, dass ihre Aktionen vom Fahrer jederzeit übersteuert werden können. Dies wiederum verlangt eine Gestaltung, die dem Fahrer den momentanen Zustand eines FAS transparent macht, so dass er ein angemessenes „inneres Modell“ des Systemverhaltens aufbauen und pflegen kann.

4.2.11 Stärken von Mensch und Maschine

Weiterhin wird die Auffassung vertreten, dass es sinnvoll ist, einem FAS die Aufgaben zu übertragen, für die der Mensch aufgrund seiner Fähigkeiten weniger geeignet ist. Dies sind Routineaufgaben, „einfache“, aber zeitkritische Aufgaben, Sehen bei Nacht und schlechter Witterung, Schätzen von Entfernungen und Geschwindigkeitsdifferenzen und permanentes Abstandhalten. Es entsteht bei dieser Aufgabenteilung aber das grundsätzliche Problem, dass ein FAS mit zunehmender „Perfektion“ in immer mehr Situationen eine bestimmte Aufgabe lösen kann, sodass der Fahrer zunehmend seltener zum Eingreifen veranlasst wird – dies aber in den verbleibenden, schwierigsten Situationen tun muss.

4.3 Systematische Entwicklung des HMI von FAS

4.3.1 Die Entwicklung des HMI im FAS-Entwicklungsprozess

Um die Bedürfnisse, Möglichkeiten und Grenzen der Nutzer in angemessener Weise zu berücksichtigen, müssen in jeder Phase der Entwicklung von FAS neben Fachleuten für die Technik HMI-Experten mit geeigneten Verfahren einbezogen werden. Bereits zu Beginn, in der Phase der Ideenfindung, stehen die Bedürfnisse der Nutzer im Mittelpunkt

der Überlegungen. Es folgt eine präzise, strukturierte Beschreibung der Leistungen des Systems und der Umstände, unter denen diese erbracht werden können. Zur Untersuchung möglicher Auswirkungen beim Einsatz derartiger Systeme werden Fragenkataloge benutzt, wie sie z. B. in dem EU-Projekt RESPONSE [5] entwickelt wurden. Es folgen Tests mit repräsentativen Nutzern in der sicheren Umgebung des Labors und im Simulator. In diesem Stadium steht oft noch kein reales HMI des FAS, sondern eine Simulation oder ein virtueller Prototyp zu Verfügung. Mit zunehmender Reife eines Systems und wachsender Erfahrung seiner Auswirkungen auf die Nutzer sind Fahrversuche im Testgelände und später im realen Verkehr möglich. Zunächst beginnt man aus Gründen der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit mit erfahrenen Experten, später werden ausgewählte Nutzergruppen eingesetzt. Sobald ein Produkt im Markt eingeführt wird, entstehen weitere Erfahrungswerte, die von HMI-Experten erfasst und ausgewertet werden. All diese Prozessschritte enthalten Iterationen, falls Modifikationen und Verbesserungen eines Systems erforderlich werden.

4.3.2 Unterstützungsbedarf des Fahrers

Ideen für sinnvolle und hoffentlich am Markt erfolgreiche FAS können aus der Information verschiedener Quellen systematisch entwickelt werden. Dazu gehören explizite Kundenwünsche, wie sie Fahrzeughersteller über ihre Verkaufsorganisationen sammeln und auswerten. Auch die Analyse von Unfalldaten, die z. B. aus der GIDAS-Datenbank [2] entnommen werden, direkte Feldbeobachtungen oder die Befragungen von Nutzergruppen sind übliche Zugangswege.

Um die Vielfalt von Benutzergruppen und möglichen Situationen zu reduzieren, hat es sich als sinnvoll erwiesen, bestimmte Nutzertypen und Fahrsituationen zu definieren und auszuwählen. Ein Nutzertyp kann beispielsweise eine „Mutter mit Kind“ sein, die entsprechende Fahrsituation die „Einfahrt in eine Tiefgarage“ im „Familienvan“. Auch die Untersuchung einer Abfolge von Situationen, wie sie z. B. bei einer „Urlaubsfahrt mit Familie in ein Hotel in Spanien“ auftreten, kann Hinweise auf einen bisher nicht identifizierten Bedarf an Unterstützung durch FAS geben.

4.3.3 Leitlinien zur Entwicklung von FIS und FAS

Leitlinie für FAS – RESPONSE Code of Practice (CoP)

In dem europäischen Projekt RESPONSE wurde durch eine Gruppe aus Kfz-Herstellern, Zulieferern, Behörden, Forschungsinstituten und Anwaltskanzleien die Verantwortung von Herstellern, Nutzern und des Gesetzgebers bei der Entwicklung und Nutzung von FAS untersucht. Die Ergebnisse mündeten in einer Leitlinie, die inzwischen bei vielen Herstellern innerhalb ihres Entwicklungsprozesses angewandt wird oder bereits vorhandene firmeninterne Prozeduren ergänzt. Wesentliche Punkte sind die Kontrollierbarkeit und Übersteuerbarkeit einer Systemaktion durch den Fahrer.

Unterscheidung der Systeme

In RESPONSE wurde unterschieden zwischen Informations- und Warnsystemen, eingreifenden Systemen, die der Fahrer jederzeit überstimmen kann, und Systemen, die der Fahrer aufgrund ihrer Auslegung oder seiner psychomotorischen Grenzen nicht überstimmen kann.

In dem Projekt liegt der Fokus vor allem auf eingreifenden Systemen (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS genannt), die eine intensive und sicherheitskritische Interaktion zwischen Fahrer, System und Fahrzeugumfeld aufweisen. Bei diesen Systemen müssen im Entwicklungsprozess nicht nur mögliche Fehler bei der Spezifikation, der Herstellung und Integration betrachtet werden, sondern auch vorhersehbare Fehler beim Gebrauch oder Missbrauch der Systeme durch den Nutzer.

Kontrollierbarkeit bei eingreifenden Systemen

In RESPONSE wurde erkannt, dass ein FAS aus Sicht des Gesetzgebers und des Nutzers nur dann zu handhaben ist, wenn es vom Nutzer jederzeit kontrolliert oder von ihm überstimmt werden kann. Bei diesen Systemen muss die Zuweisung der Verantwortung im Einzelfall genau untersucht und festgelegt werden. Wichtig sind dabei die Funktionsgrenzen des Systems, die Wahrnehmung des Fahrers von Warnungen und Grenzen sowie das möglicherweise zu erwartende Verhalten des Fahrers. Auch Fehlfunktionen des FAS können zu einer Haftung des Herstellers führen. Die Beurteilung der Risiken durch falschen Gebrauch oder Missbrauch des FAS durch den Nutzer ist anspruchsvoll. Man muss die Erwartungen der Nutzer an das System kennen, ebenso wie seine Möglichkeiten, das System zu missbrauchen. Wird der Fahrer beispielsweise einem Lenkeingriff eines FAS entgegenarbeiten,

um einem Hindernis auszuweichen? Umgekehrt kann es schwierig sein zu erkennen, ob ein Fahrer ein FAS überstimmen möchte, weil er in einer kritischen Situation eine andere Aktion als die des FAS möglicherweise für erfolgversprechender hält, oder ob seine Aktion unbewusst im Schreck geschieht. Ein vorhersehbarer Missbrauch könnte z. B. darin liegen, dass er seine Entlastung bei der Querführung des Fahrzeugs durch ein Spurführungssystem verwendet, um sich in nicht akzeptablem Umfang Nebentätigkeiten zuzuwenden.

Fehler bei informierenden Systemen
Bei Informations- und Warnsystemen verbleibt die Führung des Fahrzeugs vollständig in der Hand und Verantwortung des Fahrers. Es ist aber möglich, dass die Information oder Warnung des Systems fehlerhaft oder ungenau ist. In diesem Fall ist auch die Verantwortung des Herstellers oder Informationsanbieters in Betracht zu ziehen.

Fragenkataloge des Code of Practice
Im Projekt wurde auch ein detaillierter Fragenkatalog zur Spezifikation des FAS entwickelt (Checklist A). Darin finden sich Fragen zur Aufgabe, welche das FAS lösen soll, zur Nutzergruppe, zum Fahrzeugtyp und zum Markt, in denen das FAS eingesetzt werden soll. Auch die Sensoren, die Fahrsituation, mögliche Risiken im Gebrauch, die geplante Information des Nutzers über das System sowie Themen wie Instandhaltung und Reparatur werden mit Hilfe präziser Fragen spezifiziert. Eine zweiter Fragenkatalog (Checklist B) befasst sich mit den Auswirkungen des FAS auf den Fahrer und den Straßenverkehr.

4.3.4 Richtlinien für FIS – „European Statements of Principles on HMI“ (ESoP)

Die zunehmende Ausstattung von Fahrzeugen mit Fahrerinformations- und Telematiksystemen hat in der EU die Frage nach dem Bedarf nach einer Regelung für die Gestaltung von FIS aufgeworfen. In einer Expertenkommission wurden die Richtlinien “European Statements of Principles on Human Machine Interface” erarbeitet und am 22.12.2006 veröffentlicht [6]. Sie gelten für alle Partner in der Wertschöpfungskette dieser Systeme, vom Hersteller der Hardware, der Software, über die Datenlieferanten und die Kfz-Hersteller bis hin zu den Endkunden. Bei nachrüstbaren Systemen wurden auch die Importeure und Händler mit ihrer individuellen Verantwortung mit einbezogen. Es ist die Absicht der EU, dass diese Richtlinien in Form einer freiwilligen Selbstverpflichtung der betroffenen Partner in den jeweiligen Staaten vereinbart werden.

Die Richtlinien wurden zunächst auf FIS beschränkt; es sei aber angemerkt, dass viele dieser Prinzipien sinngemäß auch auf FAS angewendet werden können. Das übergeordnete Ziel ist es, dass der Fahrer durch FIS nicht abgelenkt, überbeansprucht oder gestört werden soll. Die Richtlinien sollen zukünftige Technologien nicht blockieren; aus diesem Grund sind sie unabhängig von speziellen Technologien formuliert. Die enthaltenen Grundsätze und Empfehlungen werden jeweils durch eine Erklärung sowie durch positive und negative Beispiele erläutert.

In den Richtlinien sind allgemeine Entwicklungsziele vorangestellt, so z. B.:

- Das System ist so zu gestalten, dass es den Fahrer unterstützt und nicht zu einem potenziell gefährdenden Verhalten des Fahrers oder anderer Verkehrsteilnehmer Anlass gibt.
- Die Aufteilung der Aufmerksamkeit des Fahrers während der Interaktion mit Anzeigen und Bedienteilen des Systems bleibt mit dem in der jeweiligen Verkehrssituation gegebenen Aufmerksamkeitsbedarf vereinbar.
- Das System lenkt nicht ab und dient nicht zur visuellen Unterhaltung des Fahrers.
- Das System zeigt dem Fahrer keine Information an, die ein möglicherweise gefährliches Verhalten des Fahrers oder anderer Verkehrsteilnehmer zur Folge haben könnte.
- Schnittstellen der Systeme und Schnittstellen mit anderen Systemen, die zur gleichzeitigen Nutzung durch den Fahrer während der Fahrt vorgesehen sind, müssen einheitlich und kompatibel gestaltet sein.

Fünf weitere Grundsätze fordern eine sichere Installation, bei der alle optischen Anzeigen gut ablesbar sind, und bei der keine Behinderung der Sicht oder des Greifraums des Fahrers erfolgt. Auch für die Interaktion mit Anzeigen und Bedienteilen, für das Systemverhalten und die Informationen für den Nutzer über das System sowie die sichere Nutzung werden Hinweise gegeben. Sie richten sich an Verkäufer, Mietwagenfirmen, an den Arbeitgeber professioneller Fahrer sowie an den Fahrer selbst.

4.3.5 Normen zur Gestaltung von FIS und FAS

CoP und ESoP enthalten Forderungen und Methoden; konkrete Zahlenwerte und Messverfahren sind hingegen nicht enthalten. Sie verweisen deshalb

auf bestehende oder in der Entwicklung befindliche Normen, die sich mit einzelnen FAS oder mit übergreifenden Konzepten wie der Gestaltung von Anzeigen, Warnungen oder Dialogen befassen.

Normen setzen Mindestforderungen; jeder Hersteller, der ein überlegenes Produkt anbieten möchte, wird die Forderungen einer Norm übertreffen wollen. Normen sind keine Gesetze, jedoch für den Hersteller weitgehend verbindliche Richtlinien. Kommt es zu Rechtsstreitigkeiten, werden Normen als Stand der Technik herangezogen. Normen sollen den technischen Fortschritt nicht behindern. Sie definieren deshalb meist nicht, wie ein bestimmtes System gestaltet sein muss („Design Standard") sondern legen fest, welche Leistungen ein bestimmtes System erbringen soll („Performance Standard"). Auch eine markenspezifische Gestaltung soll nicht verhindert werden, solange dem Benutzer daraus, z. B. beim Wechsel von Fahrzeug zu Fahrzeug, kein Sicherheitsrisiko erwächst.

4.3.6 Entwicklung von Normen

Internationale Normen werden in der ISO („International Standardisation Organisation") entwickelt, nationale deutsche Normen im DIN. Zusätzlich zu den ISO-Normen werden in den USA für den US-Markt SAE-Standards und in Japan JAMA-Standards für den japanischen Markt entwickelt. In der Regel wird versucht, diese nationalen Standards den ISO-Normen anzugleichen.

4.3.7 ISO-Normen zu HMI im Kfz

In der ISO Arbeitsgruppe TC22/SC13/WG8 werden Normen erarbeitet, die für die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrerinformationssystemen (FIS) im Fahrzeug von Bedeutung sind. Sie betreffen z. B. die Gestaltung des Dialogs zwischen Fahrer und System, die Gestaltung auditiver Information, von Bedienteilen und visueller Information. Diese Normen betreffen nicht nur einzelne FIS, sondern sollen auf alle unterschiedlichen Systeme innerhalb eines Fahrzeugs angewandt werden. Sinngemäß können sie auch auf die Interaktion eines Fahrers mit einem FAS Anwendung finden.

Zum Beispiel enthält die Norm ISO15008 [7] Forderungen über die Darstellung von Information im Fahrzeug mittels optischer Anzeigen. Dies betrifft z. B. den Beobachtungsbereich und die Lichtverhältnisse, unter denen der Fahrer die Anzeige ablesen können muss. Die Mindestkontraste, welche notwendig für eine gute Ablesbarkeit sind, werden festgelegt, ebenso die Mindestgröße von alphanumerischen Zeichen. Auch die Forderung nach Vermeidung von Reflexionen oder Spiegelungen sind enthalten. Für diese Forderungen werden, soweit sinnvoll, auch Messmethoden festgelegt. Weitere Dokumente, die bereits gültig oder noch in Entwicklung sind, betreffen das Management von Dialogen des Fahrers mit dem System (ISO15005) [8], die Gestaltung akustischer Signale im Fahrzeug (ISO15006) [9] und die Messung des Blickverhaltens des Fahrers (ISO15007) [10].

4.4 Bewertung von FAS-Gestaltungen

Bewertungsverfahren

In den verschiedenen Stadien der Entwicklung eines FAS muss die Einhaltung der Grundsätze systematisch überprüft werden. Mit zunehmender Reife eines FAS und der damit zur Verfügung stehenden Realisierung des HMI können unterschiedliche Bewertungsverfahren eingesetzt werden.

Bereits bei der Ermittlung des Unterstützungsbedarfs können Ideen für ein FAS aufbereitet und Nutzergruppen beispielsweise in einer Gruppendiskussion vorgelegt werden. Das Grundproblem dabei ist, diese Aufbereitung verständlich zu gestalten und die Leistungen und Grenzen des FAS klar zu vermitteln. Auch wenn dies anschaulich geschieht, können die Äußerungen dieser potenziellen Nutzer nur als Hinweis gewertet werden, insbesondere wenn der Umgang mit dem System „intuitiv" erfolgen wird. Es ist auch für HMI-Experten unmöglich, beispielsweise ein ACC-System vollständig zu beurteilen, solange sie keine „Erfahrung" damit gesammelt haben.

Instrumente zur Beurteilung des Fahrerverhaltens

Sobald eine Simulation oder ein Prototyp eines FAS vorliegt, können im Labor, im Fahrsimulator und später im Fahrversuch der Umgang des Nutzers mit dem System und eventuelle Auswirkungen auf das Fahr- und Fahrerverhalten untersucht werden. Dazu gehört die Ermittlung und Bewertung aussagekräftiger fahrdynamischer Größen, die beispielsweise die Längs- und Querdynamik abbilden. Diese sind im Fahrsimulator einfach zu erhalten, im Feld ist z. B. die Messung der Spurlage des Fahrzeugs aufwändiger. Auch die Messung des motorischen Verhaltens des Nutzers und der Blickbewegungen ist im Feld schwieriger. Speziell das Blickverhalten ist von großem Interesse, da Abweichungen vom

Beobachtung	Physiologische Messungen	Befragung
Fahrzeug: Dynamik Längsdynamik: z.B. Geschwindigkeit, Abstand.. Querdynamik: z.B. Spurlage, Querbeschleunigung... Mensch: Verhalten Motorik z.B. Bedienaktivität Blickverhalten z.B. Verkehr, Innenraum	Herzfrequenz Muskelspannung Hautleitwiderstand	Meinung/Einstellung Subjektive Bewertung Persönlichkeits-eigenschaften

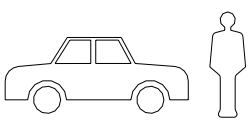
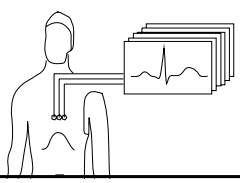
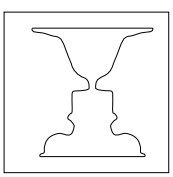




Bild 4-4: Instrumente zur Beobachtung des Fahrerverhaltens

gewohnten „Scannen“ des Fahrraums und überlange Blicke auf ein Display im Fahrzeug Hinweise auf visuelle Überbeanspruchungen, z. B. durch die Interaktion mit einem FAS, geben.

Aus physiologischen Parametern lassen sich Hinweise auf geistige oder körperliche Beanspruchungen des Fahrers ableiten, durch Fragebögen und Interviewverfahren können subjektive Einstellungen und „Erfahrungen“ erfasst werden.

Bewertungsumgebung

Untersuchungen mit Nutzern von FAS können nicht ausschließlich im Labor erfolgen. Grund ist die zwangsweise extreme Vereinfachung und Abstraktion, von der auch der HMI-Experte nur teilweise absehen kann. Der Dialog eines Eingabevorgangs bei einem Navigationssystem kann möglicherweise noch ausreichend auf einem Display am Schreibtisch überprüft werden. Einer ACC-Modellierung auf dem Bildschirm allein fehlen aber die wesentlichen fahrdynamischen Einflüsse. Auch wenn der Einfluss der Nutzung eines Informationssystems auf die primäre Fahraufgabe untersucht werden soll, muss ein geeigneter Fahrsimulator eingesetzt werden. Die Anforderungen an diesen Simulator ergeben sich aus dem Untersuchungsgegenstand. So kann es sein, dass an die Bilddarstellung besondere Ansprüche zu stellen sind, z. B. für die Untersuchung eines visuell unterstützenden FAS. Auch die Realitätsnähe der Bewegungssimulation kann besonders wichtig sein, beispielsweise bei FAS, die in die Längs- und Querführung des Fahrzeugs eingreifen. Trotz der Vorteile eines Simulators wie Sicherheit und Reproduzierbarkeit sind Fahrversuche im Feld unverzichtbar. Nur sie können die Komplexität des realen Verkehrs bieten. Auch für die prinzipielle Überprüfung der Eignung und der Übertragbarkeit eines Simulatorversuchs für eine bestimmte Fragestellung muss ein „Kalibrieren“ mittels eines Feldversuchs erfolgen. Bei Fahrversuchen auf einer Teststrecke und insbesondere im realen Verkehr muss die Sicherheit des Nutzers und anderer Verkehrsteilnehmer gewährleistet werden. Dies kann z. B. bei Fahrten auf öffentlichen Straßen durch einen mitfahrenden Fahrlehrer geschehen, der mit Hilfe einer zweiten Pedalerie in kritischen Situationen eingreifen kann. Fahrversuche, insbesondere Langzeitversuche, wie sie beispielsweise für die Ermittlung von Lernkurven und Verhaltensänderungen des Fahrers nötig sind, stellen einen aufwändigeren, aber unverzicht-

baren Bestandteil einer verantwortungsbewussten Produktentwicklung dar.

Anwendung der Verfahren und Fehlermöglichkeiten

Die Anwendung dieses Bewertungsinstrumentariums erfordert umfassende Kenntnisse und Erfahrung, wie sie durch ein entsprechendes Studium und langjährige experimentelle Arbeit aufgebaut wird. Dies beginnt mit der Auswahl eines geeigneten Untersuchungsdesigns, erstreckt sich über die Auswahl der Probanden und die Durchführung der Versuche bis hin zur Auswertung und Interpretation der Ergebnisse. Neben den bekannten Fehlermöglichkeiten beim Messen in den Naturwissenschaften, die hier ebenfalls beispielsweise bei der Verwendung von fahrdynamischen und physiologischen Sensoren auftreten können, gibt es bei der Messung mentaler Vorgänge der Nutzer eine Fülle weiterer Fallen: Bereits das Wissen um die Teilnahme an einem Experiment kann eine Ursache für verändertes Probandenverhalten sein. Auch die Anwesenheit eines Versuchsleiters während der Beobachtung und dessen Verhalten, wie z. B. Suggestivfragen und Hilfestellungen, wirken auf den Probanden ein. Bei physiologischen Messungen zeigen sich Reaktionen oft nur mit Verzögerung gegenüber dem auslösenden Reiz. Die angewandte Sensorik kann den Probanden behindern oder einschüchtern. Aufgrund der geringen Leistung der erfassten Signale sind in störreicher Umgebung wie im Kfz-Innenraum Störungen leicht möglich. Bei physiologischen Signalen ist mit erheblichen Variationen der Parameter unterschiedlicher Versuchspersonen, aber sogar bei ein und derselben Person in unterschiedlichen Situationen zu rechnen. Bei der Gestaltung und der Verwendung von Fragebögen und Interviews existieren weitere Fehlermöglichkeiten: Suggestivfragen sind unbrauchbar. Es kann sein, dass die Antworten zur sozialen Erwünschtheit tendieren oder dass Probanden glauben, sich rechtfertigen zu müssen. Auch mit Erinnerungslücken von Probanden ist zu rechnen; hier kann durch Konfrontation mit Videoaufzeichnungen des Versuchs unterstützend eingewirkt werden.

4.5 Zusammenfassung

Ein FAS muss ein transparentes Systemverhalten, zu den Erwartungen des Nutzers konforme Systemeigenschaften, eine einfache Bedien- und Erlernbarkeit und dem Nutzer vermittelbare Systemgrenzen aufweisen. Die Entwicklung eines FAS erfordert das Zusammenwirken von Experten aus Ingenieur- und Geisteswissenschaften. Im Entwicklungsprozess eines FAS sind geeignete Messverfahren einzusetzen; ihre Anwendung erfordert Expertenwissen und Erfahrung. Mit zunehmendem Eingreifen durch FAS in den Fahrprozess gewinnt die Frage der Sicherheit des Gebrauchs neben Komfort und Akzeptanz eine große Bedeutung. Viele grundlegende Anforderungen aus HMI-Sicht an FAS sind bekannt; sie sind aber noch nicht ausreichend spezifiziert und durch Messverfahren abgesichert. Weitere Fragen werden in weltweiten Entwicklungsprojekten untersucht; ihre Ergebnisse sowie Erfahrungen aus dem Einsatz von FAS im Feld müssen in Richtlinien und Normen einfließen.

Quellenverzeichnis

[1] Convention on Road Traffic, Vienna, 8.11.1968, BGBL. II 1977, S. 809–892

[2] GIDAS, German in-depth Accident Study, www.gidas.org

[3] *König, W.; Weiß, K. E.; Mayser, Ch.*: S.A.N.T.O.S – A Concept for Integrated Driver Assistance, Electronic Systems for Vehicles, Baden Baden, 2003 sowie www.santos.web.de.

[4] COMUNICAR, Communication Multimedia Unit inside Car; www.cordis.europa.eu/data/PROJ_FP5

[5] RESPONSE 3, Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS, V3.0, 31.10.2006; http://prevent-ip.org/en/prevent_subprojects/horizontal_activities/response_3

[6] Commission Recommendation of 22 December 2006 on safe and efficient in-vehicle in-formation and communication systems: update of the European Statements of Principles on human machine interface, Official Journal of the European Union, 6.2.2007, L 32/200

[7] ISO15008, Road vehicles — Ergonomic aspects of transport information and control systems — Specifications and compliance procedures for in-vehicle visual presentation, ISO TC 22/SC 13/WG8, ISO Central Secretariat, 1211 Geneva 20, Switzerland

[8] ISO15005— Ergonomic aspects of transport information and control systems — Dialogue management principles and compliance procedures, ISO TC 22/SC 13/WG8, ISO Central Secretariat, 1211 Geneva 20, Switzerland

[9] ISO15006, Road vehicles — Ergonomic aspects of transport information and control systems — Ergonomic aspects of in vehicle auditory presentation for transport information and control systems, Specifications and Compliance procedures, ISO TC 22/SC 13/WG8, ISO Central Secretariat, 1211 Geneva 20, Switzerland

[10] ISO15007, Road vehicles — Ergonomic aspects of transport information and control systems — ISO TC 22/SC 13/WG8, ISO Central Secretariat, 1211 Geneva 20, Switzerland

5 Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen

Markus Maurer

5.1 Begriffsklärung „Fahrerassistenzsysteme“

Der Begriff „Fahrerassistenzsysteme“ ist in seiner allgemein sprachlichen Bedeutung zunächst weitreichend: Ein „Fahrer“, also „jemand, der ein Kraftfahrzeug fährt“, erhält „Beistand, Mithilfe“ [6] von einem technischen System. Dabei bezeichnet das „System“ die „Gesamtheit von Objekten, die sich in einem ganzheitlichen Zusammenhang befinden und durch die Wechselbeziehung untereinander gegenüber ihrer Umwelt abzugrenzen sind“ [6].

Im Sinne dieser Definition sind auch Hilfsmittel, die bereits 1983 in einem VW Bus (VW T3) anzutreffen waren, Fahrerassistenzsysteme: Eine automatische Blinkerrückstellung, ein Tachometer, ein elektrischer Starter und ein synchronisiertes Handschaltgetriebe sind technische Systeme, die den Fahrer bei der Ausübung seiner Fahraufgabe unterstützen [34].

Diese Systeme erklären das aktuelle Interesse in Forschung, Entwicklung und Öffentlichkeit an der Fahrerassistenz allerdings nicht. Spezifischer ist hierbei eine Begriffsklärung, die von den Formen der Arbeitsteilung ausgeht. Kraiss [18] unterscheidet drei verschiedene Formen der Arbeitsteilung zwischen Mensch und Automatik. Bei der seriellen Form der Arbeitsteilung werden verschiedene Aufgaben abwechselnd nacheinander vom Menschen und der Automatik ausgeführt. Bei der parallelen Form der Arbeitsteilung werden hingegen verschiedene Aufgaben parallel von Mensch und Maschine ausgeführt. In der auch „Assistenzfunktion“ genannten Form der Arbeitsteilung werden die gleichen Aufgaben redundant-parallel von Mensch und Maschine ausgeführt.

Dies führt bei Assistenzsystemen im Kraftfahrzeug zu einer Parallelstruktur von Mensch und Maschine [15]: Fahrer und Assistenzsystem erfassen die relevanten Informationen in der Umgebung durch Sinnesorgane oder Sensoren. Auf Basis der Situationserfassung wirken sie in geeigneter Form auf das Fahrzeug ein. Fahrer und Assistenzsystem kommunizieren über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle.

Im Weiteren soll die Unterscheidung von „konventionellen Fahrerassistenzsystemen“ und „Fahrerassistenzsystemen mit maschineller Wahrnehmung“ helfen, den Begriff der „Fahrerassistenzsysteme im Kraftfahrzeug“ spezifischer zu fassen. Konventionelle Fahrerassistenzsysteme unterstützen den Fahrer in Situationen, die einfach zu messen oder zu schätzen sind. Antiblockiersysteme greifen ein, wenn ein Rad zu blockieren droht, was sich über konventionelle Raddrehzahlsensoren bestimmen lässt. Ein elektronisches Stabilitätsprogramm bremst einzelne Räder ab, wenn der geschätzte Schwimmwinkel einen applizierten Schwellwert zu übersteigen droht. Dabei stellt das elektronische Stabilitätsprogramm bereits einen Grenzfall der Klassifikation dar, da die notwendige Reibwertschätzung bereits eine Aufgabe der maschinellen Wahrnehmung ist.

Eine ähnliche Unterscheidung ist in den Code-of-Practice für so genannte „fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme“ (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS) eingegangen: „Im Gegensatz zu konventionellen Fahrerassistenzsystemen besitzen ADAS Sensoren zur Erfassung und Auswertung der Fahrzeugumgebung und je nach zu unterstützender Fahraufgabe eine komplexe Signalverarbeitung“ [5].

Als „Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung“ werden Systeme bezeichnet, die Unterstützung in Situationen anbieten, die als „wahr“ angenommen werden müssen. Im Abstandsregeltempomat (Adaptive Cruise Control, ACC, s. Kapitel 32) werden Radarreflexe als Fahrzeuge interpretiert. Beim Spurverlassenswarner (Lane Departure Warning, LDW, s. Kapitel 34) repräsentieren Hell-Dunkel-Übergänge im Videobild, die eine spezifische Gestaltannahme erfüllen, den Fahrstreifen mit ihren Begrenzungslinien.

Das Besondere an der maschinellen Wahrnehmung besteht also in der maschinellen Interpretationsleistung. Diese führt nach dem aktuellen Stand der Technik in der maschinellen Wahrnehmung zu bislang ungewohnten Möglichkeiten der Interpretation, aber auch der Fehlinterpretation. Die entstandene neue Qualität legt es nahe, die „Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung“ als eigene Systemklasse zu diskutieren. Entsprechend konzentrieren sich die Beiträge auf Fachkonferenzen zum Thema „Fahrerassistenz“ auf „Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung“ (z. B. [12] und [9]).

In diesem Beitrag wird der Begriff „Fahrerassistenzsysteme“ verstanden als redundant-paralleles System im Sinne der Definition von Kraiss (s. oben), in dem Mensch und Maschine gewisse Aufgaben

parallel erledigen. Bei diesen Unterstützungsaufgaben bedienen sich die technischen Systeme Fähigkeiten der maschinellen Wahrnehmung.

5.2 Motivation des Beitrags

Dieser Artikel wurde auf der Basis achtjähriger Erfahrung in der Entwicklung und Vorentwicklung von Fahrerassistenzsystemen bei Audi geschrieben. Er soll das Bewusstsein schärfen, dass Fahrerassistenzsysteme besondere Sorgfalt bei den Entwicklungsprozessen und bei der Gestaltung der Testverfahren erfordern. Der Autor kennt zum heutigen Zeitpunkt keine Entwicklungsprozesse und Testverfahren, die auch zukünftig alle Anforderungen erfüllen werden, welche bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen auftreten. Die aufgezeigten Methoden und Prozesse sind erste Insellösungen, die – im richtigen Verbund von Entwicklungs- und Testwerkzeugen eingesetzt – hilfreich sein können.

Dieser Beitrag soll auch dazu anregen, die Ausgestaltung von Entwicklungsprozessen, Entwicklungswerkzeugen und Testmethoden nicht allein den Serienentwicklungsabteilungen der Automobilhersteller und der Systempartner zu überlassen, sondern sie als Herausforderung für die Forschungsgruppen zu betrachten.

Was ist eine „Machbarkeitsstudie“ wert, die nicht zeigt, wie ein System getestet werden kann oder ob der Fahrer überhaupt in der Lage ist, das System an seinen Grenzen zu beherrschen? Die Machbarkeit kann erst als geklärt angenommen werden, wenn diese zentralen Fragen beantwortet wurden.

5.3 Fahrerassistenzsysteme aus Sicht des Fahrers

Die mit Fahrerassistenzsystemen verbundene Komplexität und die Einführung der maschinellen Wahrnehmung bergen für die Automobilhersteller und ihre Systempartner hohe Risiken. Die Entwicklung der Komponenten und ihrer Systeme erfordert hohe Anschub- und jahrelange Vorfinanzierungen. Der komplexe Steuergeräteverbund kann die Zuverlässigkeit des Produkts herabsetzen. Die Beherrschbarkeit an den Systemgrenzen oder bei Systemausfall ist schwer nachzuweisen und kann im Nachhinein von Gerichten anders bewertet werden, auch wenn die Entwicklerteams sorgfältig gemäß dem Stand von Wissenschaft und Technik gearbeitet haben.

Die Einführung von Fahrerassistenzsystemen muss also einen veritablen Nutzen für den Fahrer, den Fahrzeughersteller und die Systempartner erbringen, damit die Aufnahme der genannten Risiken verhältnismäßig erscheint.

Richtig ausgelegt bieten Fahrerassistenzsysteme dieses Potenzial. Die gefeierte Einführung des „Auto-mobils“ hat lange vergessen lassen, dass dieses selbst angetriebene Fortbewegungsmittel gegenüber der von Pferden gezogenen Kutsche auch zu einer Reduzierung des Grades an Autonomie führte. Gewohnte Funktionen wie „Homing“, die so manchen Kutscher sicher nach Hause gebracht hatten, oder automatisches Spurhalten, die die Fahraufgabe über längere Strecken in eine Beobachtungsaufgabe verwandelt hatten, standen über hundert Jahre in der „auto-mobilen“ Welt nicht mehr zur Verfügung.

Fahrerassistenzsysteme bieten das Potenzial, das „Auto-mobil“ auch mit autonomen Fähigkeiten auszurüsten. Persönlich halte ich zwei Entwicklungspfade für besonders verfolgenswert [30]: Der Weg zum „Autopiloten“ führt über viele kundenwerte Funktionen wie ACC und Spurhalteunterstützung (Heading Control, HC oder Lane Keeping Support, LKS, s. Kapitel 35) zum bislang nur im Forschungsbereich gezeigten autonomen Fahren (z. B. [27], [22], [31], [32], [26]). Die Rolle des Fahrers wandelt sich dabei vom aktiven Chauffeur über den entlasteten Fahrer hin zum Chauffierten.

Im Gegensatz dazu bleibt der Fahrer bei Systemen auf dem Entwicklungspfad zum technischen „Kopiloten“ immer aktiver Fahrer und wird nur im Bedarfsfall von technischen Systemen unterstützt. Zu dieser Kategorie gehören Systeme wie LDW oder Kollisionswarnsysteme (z. B. Audi Braking Guard; Mercedes-Benz: Bremsassistent Plus). Im Forschungsprojekt „Autonomes Fahren“ hat Volkswagen eine weit entwickelte Form eines technischen Kopiloten vorgestellt [2], der einen Fahrroboter überwacht hat.

Langfristig scheint mir ein drittes Paradigma großes Potenzial zu haben, welches das Fahrzeug als Werkzeug betrachtet: Hierbei wird das Gesamtsystem Fahrer-Fahrzeug optimiert. Fortschritte in der LED-Technik werden in Zukunft sehr flexible Lichtverteilungen für das Frontlicht erlauben. Damit werden neue Assistenzfunktionen möglich, wie ein Fernlicht, bei dem nur die Bereiche ausgespart werden, in denen Verkehrsteilnehmer geblendet werden könnten, oder ein Markierungslicht, das die Aufmerksamkeit des Fahrers auf relevante Objekte lenkt [1].

Denkbar wären in dieser Gruppe auch weitergehende Systeme, die helfen, die individuellen Fah-

rerdefizite wirkungsvoll zu kompensieren. Je größer die Defizite des Fahrers gegenüber dem gesunden Menschen ausfallen, desto höher werden die Anforderungen an das Werkzeug „Fahrzeug“. In einer alternden Gesellschaft eröffnen sich dadurch attraktive Absatzmärkte [19], [20].

5.4 Systematischer Entwurf von Fahrerassistenzsystemen

Viele Entwicklungen und viele Entwicklungswerkzeuge haben ihren Ursprung im militärischen Bereich. Auf die Entwicklung von komplexen technischen Systemen hat das so genannte V-Modell, das ursprünglich für Verteidigungssysteme entwickelt wurde, großen Einfluss. Das V-Modell unterstützt verschiedene Grundsätze, die helfen, komplexe Systeme strukturiert zu entwickeln. Zunächst unterstützt es ein Top-Down-Design von den groben Anforderungen auf Systemebene stufenweise hin zu Detailanforderungen auf Komponentenebene. Besonders wichtig ist im V-Modell, dass zu jeder Anforderung auch geeignete Testfälle spezifiziert werden müssen. Entsprechend zur Top-Down-Struktur der Anforderungen ergibt sich eine Bottom-Up-Struktur der Testfälle, **Bild 5-1**.

Die Einführung des V-Modells als Paradigma in der Entwicklung von elektronischen Fahrzeugsystemen hat zu einer deutlich strukturierten Entwicklungsform bei Fahrzeugherstellern und Systempartnern geführt (z. B. [4]). Je detaillierter die Anforderungen spezifiziert werden, desto deutlicher wird aber auch, dass sich komplexe Assistenzsysteme nicht vollständig testen lassen.

Kritisch wird in der Literatur der Einsatz des V-Modells diskutiert, „wenn zu Beginn des Entwicklungsvorhabens die Informationsbasis noch nicht vollständig ist und folglich das System nicht ‚von oben nach unten‘ entwickelt werden kann“ [28]. „Die Realität ist daher eher durch inkrementelle und iterative Verhaltensweisen gekennzeichnet, bei der Schritte des V-Modells oder das gesamte V-Modell mehrmals durchlaufen werden“ [29].

Diesen Bedarf nach iterativen Entwicklungsschleifen berücksichtigt ein einfaches Entwurfsmodell, das im Rahmen des Forschungsprojekts „Automatische Notbremse“ bei Audi entwickelt wurde [24]. Das Verfahren wurde bewusst einfach visualisiert: **Bild 5-2** zeigt einen Vollkreis, der eine komplette Iterationsschleife umfasst. Nach weniger als der Hälfte des Kreises ist ein „Abkürzungspfad“ definiert, der wieder zum Ausgangspunkt des Entwicklungsprozesses führt. Eine technischere Form

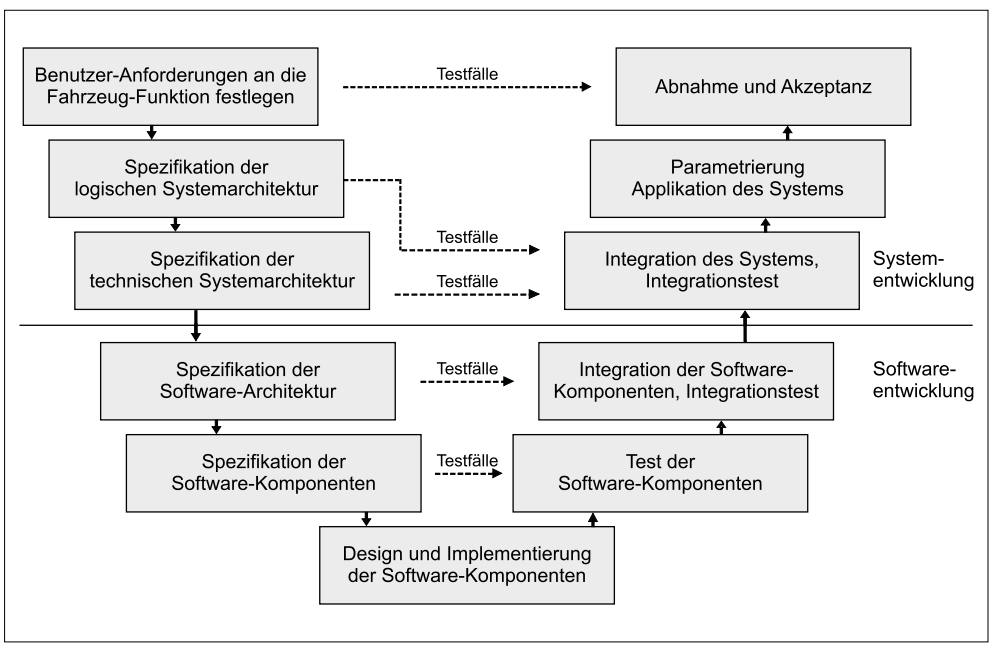


Bild 5-1: Grundstruktur des V-Modells

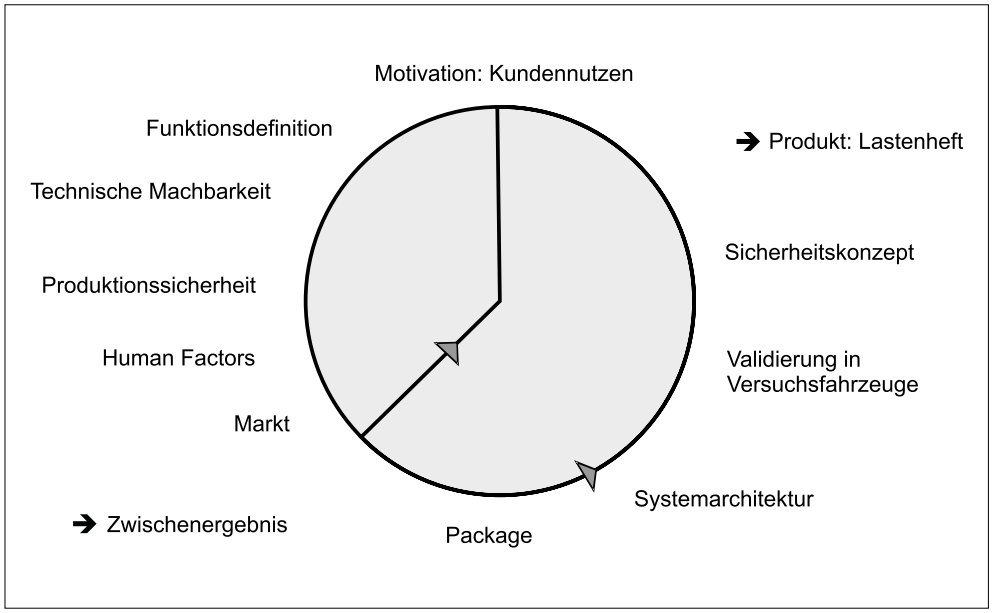


Bild 5-2: Systematischer Entwurf von Fahrerassistenzsystemen [24]

der Notation haben wir 2006 vorgestellt, bislang aber nicht weiterverfolgt [10].

Durch die beschriebene Struktur ergeben sich zwei Iterationsschleifen: Die erste, zeitlich kürzere und deutlich Ressourcen sparende Schleife erfordert Expertenwissen aus unterschiedlichen Bereichen. Die Arbeiten werden theoretisch ohne den Bau von Prototypen durchgeführt. Der Ansatz ist dann besonders wirkungsvoll, wenn die im Unternehmen verfügbaren Experten, bei Bedarf verstärkt durch externe Wissensträger, in dieser Iterationsschleife möglichst die zentralen Auslegungskonflikte identifizieren und eine fundierte Auswahl treffen zwischen den realisierbaren und den wünschenswerten, aber noch nicht realisierbaren Assistenzfunktionen.

Prototypische Systeme werden erst aufgebaut, wenn die Experten als Zwischenergebnis eine Funktionsdefinition gefunden haben, bei der alle in der theoretischen Diskussion gefundenen Auslegungskonflikte aufgelöst werden konnten oder offene Fragen auftreten, die eine experimentelle Untersuchung erfordern.

Ausgangspunkt des Entwicklungsprozesses ist immer der Fahrer und sein Unterstützungsbedarf. Das mag trivial klingen. Dem am Automobil interessierten Leser werden jedoch sofort viele Beispiele einfallen, bei denen am (Unterstützungs-) Bedarf des Fahrers vorbei entwickelt wurde. Eine sehr pointiert formulierte persönliche Meinung hat Bloch [3] veröffentlicht.

Für die Kaufentscheidung des Fahrers und damit den Markterfolg des Systems scheint der subjektiv empfundene Bedarf, nicht der objektiv zu erwartende Nutzen ausschlaggebend zu sein. Ein großer japanischer Hersteller brachte zur Einführung seiner aktuellen Oberklasselimousine öffentlichkeitswirksam Antriebs- und Fahrerassistenzsysteme auf den Markt, die sein Markenimage und seine Verkaufszahlen fördern, deren Nutzen für viele Fahrer allerdings aus Expertensicht fraglich ist.

Aus dem identifizierten Unterstützungsbedarf heraus werden Ideen für Funktionsausprägungen entwickelt, die den Fahrer in technisch beschreibbaren Szenarien unterstützen sollen. In der Expertenrunde werden diese Funktionsausprägungen darauf getestet, ob sie nach aktuellem Wissensstand mit der verfügbaren Technik realisierbar sind: Können die zu erwartenden Funktionslücken und Systemausfälle von jedem untrainierten Nutzer in jeder Situation beherrscht werden? Erscheint eine nutzertransparente Auslegung der Funktion und ihrer Grenzen möglich? Sind sinnvolle Mensch-Maschine-Schnittstellen denkbar (s. Kapitel 4)? Ist die Funktion für die Kunden finanzierbar? Passt sie zum Markenimage des Herstellers? Die Vertie-

fung der einzelnen Schritte und die Ausgestaltung der vollen Iterationsschleife werden im folgenden Abschnitt anhand eines praktischen Beispiels diskutiert.

In methodischer Hinsicht entspricht der hier beschriebene Ansatz einer Weiterentwicklung von Verfahren, wie sie in der integrierten Produktentwicklung beschrieben werden (z. B. [7]). Im Forschungs- und Entwicklungsprozess eines Systems sollte dieses Verfahren in jeder Phase berücksichtigt werden. Bereits in der universitären Forschung sollte nicht am Bedarf des Nutzers vorbeigeforscht und das öffentlich verfügbare Wissen über eine ganzheitliche Produktentwicklung genutzt werden.

In der Phase der industriellen Forschung und Vorentwicklung werden die beschriebenen Verfahren dann kommerziell bedeutender für den jeweiligen Hersteller. Die Feinjustierung erfolgt beim Einsatz innovativer Technologien gerade im Bereich der maschinellen Wahrnehmung erst in der Serienentwicklung, da oft erst mit kurz vor Markteinführung verfügbaren Musterständen der Sensoren verlässlich feststeht, inwieweit die anfangs aufgestellte Spezifikation von den realen Sensoren wirklich erfüllt wird und welche Funktionsausprägungen damit möglich sind.

Selbstverständlich sollten auch freiere Forschungs- und Vorentwicklungsvorhaben durchgeführt werden, die nicht unmittelbar auf einen bestimmten Kundennutzen zielen. Wichtig ist nur, dass diese Vorhaben auch entsprechend deklariert werden und nicht spezifischen Kundennutzen suggerieren.

5.5 Systematischer Entwurf einer „Automatischen Notbremse“

5.5.1 Nutzerorientierte Funktionsdefinition

Dank der Bemühungen von Gesetzgeber, Fahrzeugherstellern, Systempartnern und Rettungswesen sinkt die Anzahl der jährlichen Unfalltoten in Deutschland seit vielen Jahren. Dennoch stellt die absolute Zahl der Getöteten im Straßenverkehr mit über 5000 im Jahr allein in Deutschland eine Motivation dar, die Sicherheit im Straßenverkehr weiter zu erhöhen. Es herrscht Konsens unter den Automobilherstellern, dass durch Maßnahmen der passiven Sicherheit deutliche Verbesserungen nur bei hoher

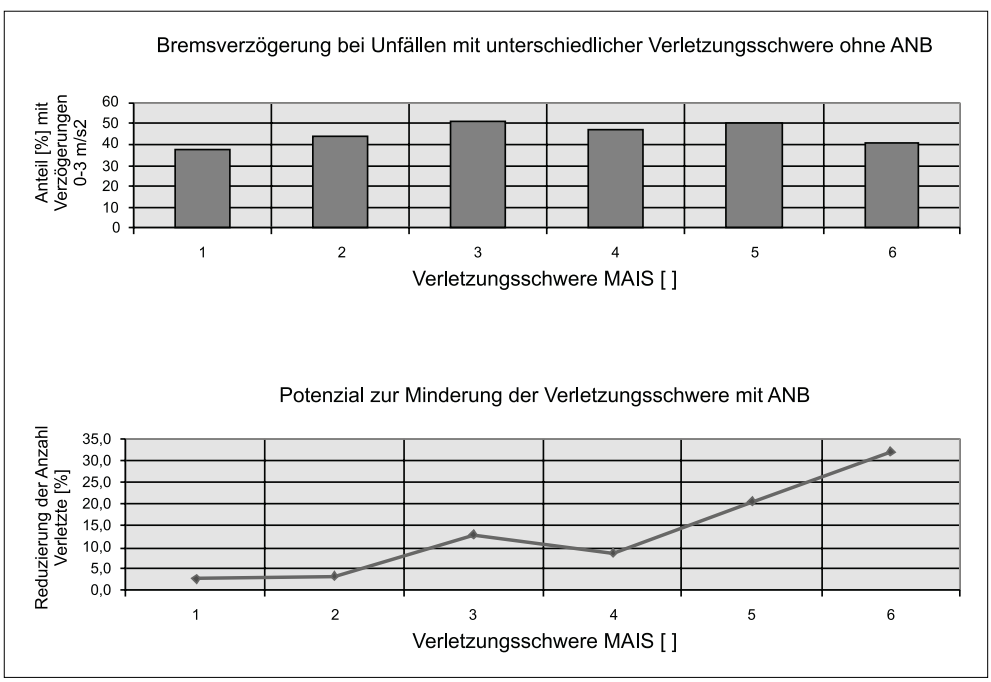


Bild 5-3: Theoretisches Potenzial einer automatischen Notbremse [17]

Gewichts- und Verbrauchszunahme der Personenkraftwagen zu erreichen wäre. Hohes Potenzial zur Erhöhung der Insassensicherheit wird Systemen der aktiven Sicherheit zugeschrieben. Fahrerassistenzsysteme sollen auf Basis ihrer Situationserfassung die Unfallschwere mindern oder Unfälle ganz vermeiden.

Analysen der Unfallforschung zeigen, dass viele Fahrer das Verzögerungspotenzial ihrer Fahrzeuge nicht ausschöpfen. Im **Bild 5-3** ist die statistische Auswertung einer Unfalldatenbank gezeigt: Für jede Verletzungsklasse MAIS wird ausgewiesen, welcher prozentuale Anteil an Fahrern eine Komfortbremsung mit einer Verzögerung von maximal 3 m/s^2 getätigt hat, obwohl eine stärkere Verzögerung zumindest unfallschwereminderndnd gewirkt hätte ([35], Kopischke [17] zitiert nach [24]).

Aufgrund dieses identifizierten Unterstützungsbedarfs wird eine erste Funktionsdefinition für den Start einer Konzeptentwicklungsphase festgelegt: „Eine Notbremsung, d. h. Bremseingriff mit max. Verzögerung, wird dann veranlasst, wenn ein Unfall fahrphysikalisch nicht mehr zu verhindern ist. Damit wird dem Fahrer weiterhin jede Freiheit gelassen und nur dann ausgelöst, wenn er auch bei noch so guten Fahrfähigkeiten die Kollision nicht mehr verhindern könnte (...)“[16]. Diese Funktionsdefinition zeigt auch, dass bereits zu Beginn der Konzeptentwicklungsphase erhebliches Vorwissen vorhanden war: Man beschränkt sich von Beginn an auf ein System der Unfallschwereminderung, um Produkthaftungsansprüche von Fahrern oder ihren Angehörigen zu vermeiden, die nach Auslösen einer Notbremse argumentieren, diese sei zu früh erfolgt und habe den Unfall sogar verursacht.

Die Sichtung der verfügbaren Radar-, Lidar- und Videosensorik ergibt, dass die Funktion prinzipiell einfach darstellbar ist, solange die Szenarien einfach gestaltet werden und die Witterungsverhältnisse die jeweiligen Sensorprinzipien nicht an ihre Grenzen führen. Im diskutierten Fall soll untersucht werden, ob die Funktion nicht durch einen Radarsensor eines konventionellen ACC-Systems dargestellt werden kann.

Spätestens bei einer ersten Risikoanalyse wird jedoch deutlich, dass es viele mögliche Situationen im Straßenverkehr geben kann, die jedes mögliche Sensorprinzip überfordern. Nichtauslösungen einer automatischen Notbremse werden als weniger kritisch angesehen, da das ausgerüstete Fahrzeug nicht unsicherer als ein konventionelles Fahrzeug sein wird.

Kritisch wird der Fall betrachtet, wenn eine Notbremse ohne Vorliegen der oben beschriebenen Auslösungssituation automatisch gestartet wird. Da die Funktionsprinzipien der Einzelsensoriken bekannt sind, ist für die Experten offensichtlich, dass Fehlauslösungen zwar selten sein können, aber zumindest nach dem aktuellen Stand der Technik nicht völlig auszuschließen sind. Radarexperten ist die bei modernen Systemen selten auftretende Situation der „fahrenden Gasse“ bekannt, bei der sich zwei Fahrzeuge mit sehr ähnlicher Geschwindigkeit bewegen, die von der Signalverarbeitung als ein in der Gasse liegendes virtuelles Objekt interpretiert werden kann. Ein solches „Geisterobjekt“ könnte eine unberechtigte automatische Notbremse verursachen.

Folgenschwer wird auch der Einwand der Produktsicherheitsexperten sein, dass Gerichte im Schadenfall nach Analogien suchen. Hier wird als Analogie erwartet, dass Redundanz in der Wahrnehmung der entscheidenden Parameter gefordert werden könnte, da etwa bei einem ESP-System wesentliche Parameter ebenfalls redundant erfasst werden.

Bereits in dieser frühen Phase weisen die Experten darauf hin, dass die zu erwartenden Funktionsgrenzen auch kommunizierbar sein müssen und dass der Hersteller dafür verantwortlich ist, dass die richtige Kundenerwartung erzeugt wird. Dieses Expertenwissen ist dank der Response-Projekte in verschiedene Hilfsmittel eingeflossen ([14], [5]).

Ebenfalls wird gefordert, dass das System an seinen Grenzen zumindest in der Lage sein muss, seine Degradation selbst festzustellen und den Fahrer entsprechend zu warnen.

Für den Nachweis, dass ein System fehlerfrei funktioniert hat, werden ein Datenrekorder oder zumindest entsprechende Eintragungen in den Entwicklungsspeicher als sinnvoll erachtet.

Zentral wird daher die Frage, ob diese unbegründete automatische Auslösung für einen Fahrer und den folgenden Verkehr sicher zu beherrschen wäre. Die Untersuchung dieser Fragestellung erfordert erstmalig den Aufbau von Prototypen und damit das erste vollständige Durchlaufen der äußeren Iterationsschleife. Die Ergebnisse sind eindeutig: Mehr als ein Drittel der Fahrerreaktionen werden als „angstvoll, panisch“ kategorisiert. Ebenfalls mehr als ein weiteres Drittel reagiert „erschrocken, [mit] Tunnelblick“. Ein Zusammenhang der „überraschten“ oder „neugierigen“ Reaktionen damit, dass die im Versuch gestellten Fehlreaktionen auf dem Testgelände gestellt wurden, kann nicht ausgeschlossen werden (s. **Bild 5-4**, [8]).

Diese Untersuchungen zeigen, dass mögliche Fehlauslösungen einer „automatischen Notbremse“

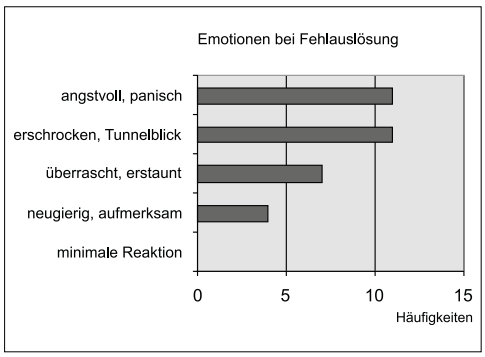


Bild 5-4: Emotionen (aufgrund von Augen- und Gesichtsausdruck) nach einer Fehlauslösung einer Automatischen Notbremse (n = 33) [8]

für den Fahrer, den nachfolgenden Verkehr, den Fahrzeughersteller und den Systempartner ein nicht zu unterschätzendes Risiko darstellen.

Neben den technischen, ergonomischen und juristischen Fraktionen sollte bereits in Konzeptphasen das Produktmarketing einbezogen werden. Was helfen aufwendige, technische Innovationen, wenn sie nicht ins Markenleitbild passen und deshalb auch nicht ausgelobt werden? Bei den Assistenzfunktionen kommt erschwerend hinzu, dass die bereits erwähnten zu erwartenden Funktionslücken dazu führen, dass Produkte nicht allzu offensiv beworben werden können. Der Hersteller trägt die Verantwortung für die Kundenerwartung (siehe oben).

Nach der ersten Iterationsschleife ergibt sich folgende Bilanz: Es wurde eine Funktionsausprägung mit großem Wirkungsfeld identifiziert. Die im Entwicklungsauftrag gewünschte Sensorik beschränkt den Nutzen auf den Längsverkehr. Dafür wäre die Realisierung mit der bekannten ACC-Sensorik kostengünstig. Vergleiche mit anderen Sicherheitssystemen zeigen aber, dass dort redundante Erfassung der funktionsbestimmenden Zustandsgrößen gefordert wird. Die ergonomischen Untersuchungen, die bereits im Frühstadium praktisch durchgeführt werden mussten, zeigen, dass Fehlauslösungen einer automatischen Notbremse dieser Funktionsausprägung nicht akzeptabel sind.

Da in diesem Fall kein konsistentes Zwischenergebnis gefunden wird, muss die weitere Entwicklung grundlegend modifiziert werden. Eine langfristige Entwicklungsrichtung kann durch möglichst komplementäre Wahrnehmungsprinzipien versuchen, die Fehlauslösewahrscheinlichkeit sehr zu verringern.

Kurzfristig soll eine konsistente Funktionsdefinition dadurch erreicht werden, dass die Funktionsdefinition variiert wird. Die Fehlauslösungen haben sich im Versuch als sehr eindrucksvoll erwiesen (siehe oben). Könnte nicht ein schwacher Bremsruck, bei dem der Fahrer durch einen haptischen Ruck gewarnt wird, den Fahrer auf eine Gefahr hinweisen, ohne dass der rückwärtige Verkehr im Falle einer Fehlauslösung durch ein plötzliches, unerwartetes Abbauen der Geschwindigkeit gefährdet wird?

Experimentelle Untersuchungen bestätigen beide Erwartungen. Der Warnruck stellt ein wirksames Warnmedium dar, bei dem mit einem geeigneten Bremssystem kaum Verzögerung aufgebaut wird. Daher wird in einer zweiten Iteration zunächst ein Warnsystem entwickelt, das den Fahrer wie beschrieben auf Gefahren hinweist. Da dieser Eingriff auch dann unkritisch ist, wenn er ungerechtfertigt erfolgt, wird als Fehlauslöserate eine Fehlauslösung auf 10 000 km festgelegt.

Diesmal ist das Zwischenergebnis vielversprechend: Die Warnung über den haptischen Sinneskanal ist sehr direkt und wirksam. Daher wird hoher Kundennutzen prognostiziert. Bei einer Nutzung der ACC-Sensorik beschränkt sich der Nutzen wiederum auf den Längsverkehr. Dafür kann die Funktion kostengünstig ohne weitere Sensorhardware dargestellt werden. Die Fehlauslösungen erweisen sich als beherrschbar und akzeptabel. Eine so definierte Funktion kann nun kurzfristig in Serienfahrzeugen angeboten werden (Produktname: Audi: „Audi Braking Guard“; VW: „Front Scan“, Markteinführung: 2006).

Die Weiterentwicklung der ursprünglichen Funktionsidee einer automatischen Notbremse wird

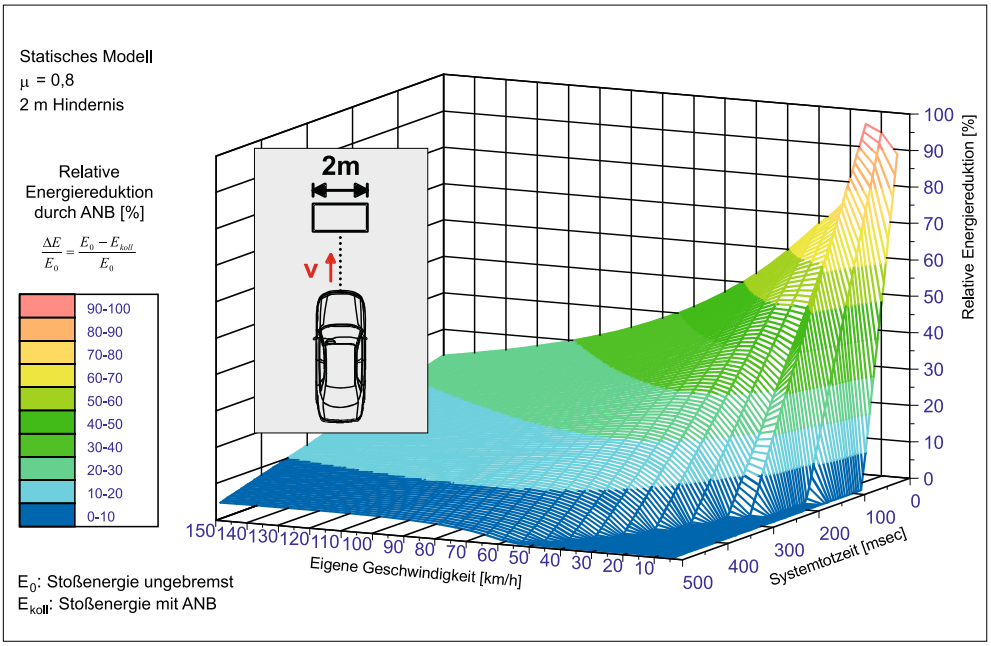


Bild 5-5: Einfluss der Totzeit auf die relative Energiereduktion einer Automatischen Notbremse [17]

technisch aufwendigere Lösungen erfordern. Für die aus der ersten Entwicklungsschleife bekannte Funktionsdefinition können nun quantitative Prognosen für den Nutzen angegeben werden. Wichtig ist auch die Analyse, welche Parameter für den Nutzen entscheidend sind. So zeigt **Bild 5-5**, wie die relative Energiereduktion und damit der Nutzen von der Systemtotzeit abhängen. Diese Darstellung kann hilfreich sein, um im Unternehmen den Nutzen eines schnelleren Bremssystems quantitativ zu belegen; sie kann auch bei der Auswahl der Sensorik hilfreich sein ([17] zitiert nach [24]; s. auch Kapitel 33).

Durch die Kombination geeigneter Sensorprinzipien kann die Robustheit der maschinellen Wahrnehmung deutlich erhöht werden. Übliche Sensorkonfigurationen bestehen aus einem Fernbereichssensor (77 GHz Radar oder Lidar), der für ACC benötigt wird, und einem Sensor mit größerem Öffnungswinkel und geringerer Reichweite, bei dem Prinzipien wie Stereosehen, monokulares Sehen, Laser, Radar oder Photonic Mixing Device (PMD) zum Einsatz kommen. Die Forderung nach Redundanz würde auch durch ein Doppelradarverfahren mit zwei Fernbereichsverfahren erfüllt [21]. Bei allen skizzierten Lösungsansätzen bleibt der Nutzen des Systems auf den Längsverkehr beschränkt. Die Wahrscheinlichkeit für Fehlauslösungen wird herabgesetzt; diese bleiben aber kritisch.

Am Beispiel dieser dritten Iteration sollen die prototypische Darstellung der Funktion, Aspekte der Systemarchitektur und der Funktionstests detaillierter erläutert werden.

Vielfach unterschätzt wird die Einbindung der Sensoren in das Designkonzept des Fahrzeugs. Erfolgt diese nicht frühzeitig, so kann das die Integration der Sensoren gefährden, gerade dann, wenn sie nicht für die vitalen Grundfunktionen des Fahrzeugs sondern „nur“ für die Assistenz erforderlich sind.

5.5.2 Aspekte der Systemarchitektur

Multimodale Umgebungssensoren und darauf basierende vernetzte Assistenzfunktionen erhöhen die Komplexität des Rechnerverbunds und der damit verbundenen Software im Fahrzeug signifikant. Die Beherrschung der Systemkomplexität wird damit zur Schlüsselkompetenz für die Automobil-

hersteller und ihre Partner. Neben den bereits im Titel des Beitrags genannten Aspekten „Entwurf“ und „Test“ kommt der Systemarchitektur und ihrer sorgfältigen Planung eine Schlüsselrolle bei der Beherrschung dieser Komplexität zu.

Es empfiehlt sich, die Umgebungssensoren bereits in der Planungsphase der Topologie der Fahrzeugnetze zu berücksichtigen. Datenströme, wie sie bei der Fusion von Sensordaten in der Umgebungswahrnehmung auftreten können, können topologiebestimmend für Fahrzeugnetzwerke werden (siehe Kapitel 9).

Unter dem Begriff „Systemarchitektur“ seien hier fünf Aspekte subsumiert. Die funktionale Systemarchitektur dekomponiert das Gesamtsystem aus Sicht der Gesamtfunktion und ihrer funktionalen Bausteine. Sie bedient sich Darstellungsweisen aus dem Bereich der „Systemdynamik“ und „Regelungstechnik“. Die explizite Wissensrepräsentation kann elegant mit Methoden der objektorientierten Softwareentwicklung modelliert werden. Zunächst unabhängig von ihrer technischen Realisierung sollten die Eigenschaften des Fahrzeugs aus Kundensicht beschrieben werden (z. B. [13]). Alle drei Aspekte werden im Idealfall unabhängig von der Hardware diskutiert und bleiben bei der Migration auf andere Hardwareplattformen stabil.

Die Hardware selbst und Aspekte der hardwarenahen Programmierung gehören zu den Hardwareabhängigen Aspekten der Systemarchitektur.

Die fünf verschiedenen Aspekte der Systemarchitektur werden bei den Automobilherstellern und ihren Partnern unterschiedlich stark betrachtet. In allen Entwicklungsabteilungen wird die Topologie der Vernetzung der Steuergeräte intensiv vorbereitet und geplant. Die Anforderungen und aktuelle Beispiele für Vernetzungsarchitekturen für Kraftfahrzeuge mit Fahrerassistenz finden sich in Kapitel 9.

Auch die hardwarenahe Software wird zunehmend steuergeräteübergreifend standardisiert und vorbereitet. Ein wichtiger Schritt zu einer stärker hardwareunabhängigen Systemauslegung ist in den Häusern gelungen, die bereits vor der eigentlichen Entwicklungsphase des Fahrzeugs dessen Eigenschaften aus Kundensicht intensiv diskutieren und festlegen (siehe oben, [13]).

Weiteres Potenzial für die strukturierte Systemauslegung besteht bei einzelnen Herstellern durch die konsequente Nutzung der erwähnten Aspekte der funktionalen Systemarchitekturen und einer zentralen Planung der expliziten Repräsentation im Fahrzeug (z. B. [23]).

5.5.3 Funktionale Tests von Fahrerassistenzsystemen

Der Begriff des „Testens“ wird heute in der Praxis der Automobilentwicklung häufig unspezifisch gebraucht. Er beschreibt so unterschiedliche Testkategorien wie funktionale Tests, Bediensicherheit für den Nutzer, Tests zur Nutzertransparenz, Tests zur Kundenakzeptanz, Tests zur elektromagnetischen Verträglichkeit, Klimatests, Tests zur Fahrzeugakustik, Tests zur aktiven und passiven Sicherheit des Fahrzeugs, elektrische und elektronische Tests, die auch Hardware-in-the-Loop mit einschließen, Tests zur Integrität der Software einschließlich Software-in-the-Loop. Die Liste ließe sich noch weiter fortführen. Jedes Thema für sich ist im Bereich „Fahrerassistenz“ anspruchsvoll sowie komplex und verdiente die Würdigung in einem eigenen Kapitel. Alle technischen Entwicklungs- und Qualitätssicherungsbereiche des Unternehmens sind betroffen und leisten ihren Beitrag.

Aufgrund meines persönlichen Erfahrungshintergrunds beschränke ich mich hier auf funktionale Testaspekte, die wieder am Beispiel der Entwicklung einer automatischen Notbremse diskutiert werden sollen. Zwei Fehlfunktionen verdienen spezielle Beachtung, da sie besonderen Einfluss darauf haben, wie das System vom Fahrer und der Öffentlichkeit wahrgenommen wird. Es wurde bereits erwähnt, dass die Reaktion des Nutzers auf eine unberechtigte Auslösung deutlich ausfiel, was zu der Forderung führte, diese zu vermeiden. Aus Sicht der experimentellen Durchführung sind der Test der berechtigten Auslösung und die Untersuchung der Nutzerreaktion aufwendiger, da es hier aufgrund der Funktionsdefinition zu einer Kollision kommt.

Entscheidend für die Akzeptanz einer automatischen Notbremse der genannten Funktionsausprägung ist die Fehlerwahrscheinlichkeit für unberechtigte Auslösungen, die erfolgen, ohne dass sie ein menschlicher Beobachter für angemessen hält. Dabei wird die Frage, welche Fehlerwahrscheinlichkeit gesellschaftlich akzeptabel sein wird, in diesem Artikel unbeantwortet bleiben. Analogien aus dem Bereich der Luftfahrt oder der Medizin könnten hier den Weg weisen [11].

5.5.4 Testfall „berechtigte Auslösung“ – Vehicle-in-the-Loop

Im Testfall der berechtigten Auslösung für eine automatische Notbremse bestehen folgende Anfor-

derungen an den Test: Es wird eine automatische Notbremsung ausgeführt; dabei wird es zum Aufprall kommen. Der Fahrer und das Fahrzeug sollen dabei nicht gefährdet werden. Die Situation soll für den Fahrer realistisch erscheinen. Der Test soll möglichst reproduzierbar ausgeführt werden. Einfache Testaufbauten oder Untersuchungen im Fahrsimulator erfüllen nicht alle Kriterien: Bei Untersuchungen im Fahrsimulator wären das Bedrohungsszenario und die Dynamik der Fahrzeugreaktion nicht realistisch genug wahrzunehmen. Bei realen Kollisionen mit Schaumstoffwürfeln, Fahrzeugauslegern und kleinen mobilen Hindernissen wirkte das Bedrohungsszenario ebenfalls nicht realistisch genug. Auch wären diese Versuche nicht hinreichend reproduzierbar durchzuführen.
Die Anforderungen an funktionale Auslösetests wurden von einer Neuentwicklung erfüllt – dem so genannten Vehicle-in-the-Loop-Verfahren (Vehicle-in-the-Loop, VIL), das in Kapitel 8 ausführlich beschrieben wird.

5.5.5 Fehlerwahrscheinlichkeit für „unberechtigte Auslösung“ – trojanische Pferde

Ebenso anspruchsvoll wie der beschriebene Test der berechtigten Auslösung ist die experimentelle Absicherung, dass die Fehlerwahrscheinlichkeit pro Zeit maximal 10^{-9} pro Stunde betragen dürfe. Nimmt man an, dass die mittlere Kilometerleistung eines Fahrzeugs bei nur 30 Kilometern in der Stunde liegt, ergibt sich damit der Bedarf, 30 Milliarden Testkilometer zu fahren, ohne dass eine Fehlauslösung auftritt. Dieser Bedarf kann wirtschaftlich im Rahmen einer Fahrzeugentwicklung nicht durchgeführt werden. Daher sind alternative Absicherungsmethoden gefragt.

Der Vorschlag eines trojanischen Pferdes [33] sieht vor, neue Funktionen im Kundenfahrzeug zu erproben. Der Kunde würde eine Komfortfunktion erwerben, die mit der gleichen Sensorkonfiguration umgesetzt wird. Das könnte beispielsweise eine Funktionsausprägung von ACC Stop&Go sein. Die realisierte Software enthielte zusätzlich alle Funktionen einer automatischen Notbremse, der aber der Zugriff auf die Bremsaktorik verweigert werden würde. Die Notbremsfunktion bewirkt einen Eintrag in einen Entwicklungsspeicher. Wird im Kundendienst ein Entwicklungsspeichereintrag entdeckt, resultiert dieser entweder aus einem Unfall, der dann bekannt sein müsste, oder er wurde durch eine Fehlauslösung verursacht. Prinzipiell lägen damit alle Informationen vor, um die gesuchte Fehlerwahrscheinlichkeit einer Auslösung zu ermitteln. Dem Autor ist derzeit keine aktive Diskussion unter den Fahrzeugherstellern darüber bekannt, ob dieses Verfahren in Zukunft zur Absicherung eingesetzt werden kann. Auch kann nicht ausgeschlossen werden, dass Hersteller oder Systempartner diese Methode bereits nutzen, ohne dies zu kommunizieren.

Die Diskussion, ob bei der Systemauslegung die IEC Norm 61508 zur Anwendung kommen sollte oder ob durch den aktuellen Arbeitsentwurf CD 26262 neue Entwurfsrichtlinien entstehen, wird hier bewusst ausgeklammert.

5.6 Zusammenfassung

Durch die technologischen Fortschritte in der Mikroelektronik sind Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung heute möglich geworden. Die in der maschinellen Wahrnehmung interpretierten Daten von Umgebungssensoren ermöglichen Fahrerassistenzsystemen die Möglichkeit, die Objekte in der Umgebung und ihre Bedeutung für den menschlichen Fahrer und sein Fahrzeug zu erfassen. Diese Interpretationsleistung hat heute noch nicht die Zuverlässigkeit von konventionellen Sensoren im Automobil oder die eines aufmerksamen Fahrers. Daher sind neue Entwurfs- und Testprozesse erforderlich.

Die maschinelle Wahrnehmung erhöht die Komplexität der Software und der Hardware im Kraftfahrzeug signifikant. Es muss nachhaltiger Kundennutzen zu erwarten sein, wenn sich der Aufwand für die Kunden, den Hersteller und seine Partner langfristig lohnen soll.

Der hier vorgestellte systematische Entwurfsprozess für Fahrerassistenzsysteme geht konsequent vom Kundenutzen aus und berücksichtigt bereits in der Entwurfsphase neben technischen Fragestellungen auch rechtliche, ergonomische und ökonomische. In allen Phasen des Forschungs- und Entwicklungsprozesses werden iterative Entwicklungsschleifen empfohlen. Nur wenn Kompromisse für vorab absehbare Auslegungskonflikte erreichbar erscheinen, lohnt sich die Investition in Prototypen und die Entwicklung von Testaufbauten.

Quellenverzeichnis

[1] *Berlitz, S.*: LED is now, what´s next? ISAL 2007 – International Symposium on Automotive Lighting, 25. – 26. September 2007, Darmstadt, 2007

[2] *Binfet-Kull, M.; Heitmann, P.; Ameling, C.*: System Safety for an Autonomous Driving Vehicle. In: IEEE Int. Conf. On Intelligent Vehicles, Stuttgart, 1998

[3] *Bloch, A.*: Tech No. www.auto-motor-und-sport.de, 16/2007

[4] *Breu, A.; Holzmann, M.; Maurer, M.; Hilgers, A.*: Prozess zur Komplexitätsbeherrschung bei der Entwicklung eines Stillstandsmanagements für ein hochvernetztes Fahrerassistenzsystem. Stillstandsmanagement. 8. – 9. November 2007, Haus der Technik, Essen, 2007

[5] *Donner, E.; Winkle, T.; Walz, R.; Schwarz, J.*: RESPONSE 3 – Code of Practice für die Entwicklung, Validierung und Markteinführung von Fahrerassistenzsystemen. VDA. Technischer Kongress. 28./29. März 2007, Sindelfingen, 2007

[6] Duden. Das große Wörterbuch der deutschen Sprache, 10 Bde. Duden-Verlag, Mannheim, 1999

[7] *Ehrlenspiel, Klaus*: Integrierte Produktentwicklung. Hanser, München, 2003

[8] *Färber, B.; Maurer, M.*: Nutzer- und Nutzenparameter von Collision Warning und Collision Mitigation Systemen. In: *Maurer, M.; Stiller, C.* (Hrsg.): Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS2005, Walting, 2005

[9] FAS (2002, 2003, 2005, 2006, 2008): 1.–5. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS200X, Walting, Leinsweiler, Walting, Löwenstein, Walting. Konferenzbände hrsg. von Maurer, M. & Stiller, C.; FMRT am Institut für Mess- und Regelungstechnik der Universität Karlsruhe, Engler-Bunte-Ring 21, 76131 Karlsruhe; www.mrt.uni-karlsruhe.de

[10] *Glaser, H.*: Fahrwerk und Fahrerassistenz – eine ideale Kombination? In: 7. Symposium zum Thema Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel. AAET 2006. 21. – 23. Februar 2006, Braunschweig, 2006

[11] *Homann, K.*: Wirtschaft und gesellschaftliche Akzeptanz: Fahrerassistenzsysteme auf dem Prüfstand. In: *Maurer, M.; Stiller, C.* (Hrsg.): Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung. Springer, Heidelberg, 2005

[12] IV: 1991–1996: Intelligent Vehicles Symposium; 1997: Intelligent Transportation Systems; 1998–2008: Intelligent Vehicles Conference, IEEE, Veranstaltungsorte wechselnd in Amerika, Asien und Europa, 1991–2008

[13] *Kohoutek, P.; Dietz, J.; Burggraf, B.*: Entwicklungsziele und Konzeptauslegung des neuen Audi A4. In: ATZ/MTZ extra – Der neue Audi A4, September 2007, Vieweg, Wiesbaden, 2007

[14] *Kopf, M.* et al.: RESPONSE Checklist for theoretical Assessment of Advanced Driver Assistance Systems: Methods, Results and Assessment of Applicability. 1999

[15] *Kopf, M.*: Was nützt es dem Fahrer, wenn Fahrerinformations- und -assistenzsysteme etwas über ihn wissen? In: *Maurer, M., Stiller, C.* (Hrsg.): Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung. Springer, Heidelberg, 2005

[16] *Kopischke S.*: Entwicklung einer Notbremsfunktion mit Rapid Prototyping Methoden. Dissertation, TU Braunschweig, 2000

[17] *Kopischke S.*: Persönliche Kommunikation, Ingolstadt, 2000

[18] *Kraiss, K.-F.*: Benutzergerechte Automatisierung – Grundlagen und Realisierungskonzepte. In: at – Automatisierungstechnik 46 Band 10, S. 457–467, Oldenbourg, München, 1998

[19] *Krüger, H.-P.*: Persönliche Kommunikation, Walting, 2005

[20] *Krüger, H.-P.*: Hedonomie – die emotionale Dimension der Fahrerassistenz. Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, München, 2008

[21] *Lucas, B.; Held, R.; Duba, G.-P.; Maurer, M.; Klar, M; Freundt, D.*: Frontsensorsystem mit Doppel Long Range Radar. In: *Maurer, M., Stiller, C.* (Hrsg.): 5. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS2008, Walting, April 2008

[22] *Maurer, M.; Behringer R.; Fürst, S.; Thomanek, F.; Dickmanns E. D.*: A compact vision system for road vehicle guidance. In: 13th Int. Conference on Pattern Recognition, S. 313–317, Wien, 1996

[23] *Maurer, M.*: Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen. Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 12: Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik. Bd. 443, Ingolstadt, 2000

[24] *Maurer, M.; Wörsdörfer, K.-F.*: Unfallschwereminderung durch Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung – Potentiale und Risiken, Unterlagen zum Seminar „Fahrerassistenzsysteme und aktive Sicherheit“, Haus der Technik, Essen, 20. November 2002

[25] *Maurer, M.; Stiller, C.* (Hrsg.): Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung“. Springer, Berlin, 2005

[26] *Maurer, M.; Stiller, C.* (Hrsg.): 5. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS2008, Walting, April 2008

[27] *Pomerleau, D.; Jochem, T.*: Rapidly Adapting Machine Vision for Automated Vehicle Steering. IEEE Expert, Bd. 11, Nr. 2: S. 19–27, 1996

[28] *Reif, K.*: Automobilelektronik – Eine Einführung für Ingenieure. ATZ/MTZ-Fachbuch, Vieweg+Teubner Verlag, 2009

[29] *Schäuffele, J.; Zurawka, T.*: Automotive Software Engineering. 3. Auflage, ATZ/MTZ-Fachbuch, Vieweg, 2006

[30] *Siedersberger, K.-H.; von Holt, V.*: Persönliche Kommunikation, Ingolstadt, 2005

[31] *Singh, Sanjiv (ed.)*: Journal of Field Robotics, Volume 23, Issue 8, August 2006, Special Issue on the DARPA Grand Challenge (Part 1)

[32] *Singh, Sanjiv (ed.)*: Journal of Field Robotics, Volume 23, Issue 9, September 2006, Special Issue on the DARPA Grand Challenge (Part 2)

[33] *Winner, H.*: Patent DE 101 02 771 A1: Einrichtung zum Bereitstellen von Signalen in einem Kraftfahrzeug. Deutsches Patent- und Markenamt, Anmeldetag: 23.01.2001, Offenlegungstag: 25.07.2002
[34] *Winner, H.*: Fahrerassistenzsysteme. Skript zur Vorlesung, 1. Aufl., Darmstadt, 2003
[35] *Zobel, R.*: Persönliche Kommunikation, Ingolstadt, 1999

6 Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen

Jörg Breuer

6.1 Zielsetzung der nutzerorientierten Bewertung

Abgeleitet vom lateinischen „assistere“ (jemandem beistehen, behilflich sein, jemandem nach dessen Anweisungen zur Hand gehen) ist die Bezeichnung „Assistenzsystem“ durchaus bewusst gewählt und beschreibt Anspruch und Grenzen dieser technischen Systeme treffend. Sie sollen den Fahrer auf dessen Wunsch hin bei bestimmten Teilen der Fahrzeugführungsaufgabe durch Informationen unterstützen (Informationssysteme) bzw. von bestimmten Teilaufgaben entlasten (Komfortsysteme). Bestimmte Assistenzsysteme können dem Fahrer auch in kritischen Situationen durch einen Eingriff dabei helfen, seinen Wunsch nach sicherer Bewältigung umzusetzen. Somit können diese technischen Systeme sowohl zur Erhöhung des Komforts als auch der Sicherheit beitragen. Assistenzsysteme sollen und können den Fahrer jedoch nicht ersetzen und können ihn auch nicht aus der Verantwortung für das sichere Führen eines Fahrzeugs entlassen.

Für wirksame Systeme mit hoher Akzeptanz sind folgende Gestaltungsprinzipien zugrunde zu legen und in geeigneten Versuchen zu bewerten [1], vgl. [2]:

Schnelle Eingewöhnung
So wie es bei einer Führungskraft und einem Assistenten erst nach einer Eingewöhnungsphase zu einem optimalen Zusammenwirken kommt, benötigt der Fahrer eine gewisse Zeit, um mit einem neuen technischen Assistenten vertraut zu werden und ihn optimal nutzen zu können. Ein korrektes mentales Modell der Technik ist Grundlage für deren richtige Nutzung. Diese nicht vermeidbare Phase möglichst kurz zu halten, ist Aufgabe des Fahrzeugherstellers. Systeme, die nur in bestimmten, kritischen Situationen eingreifen, bedürfen verständlicherweise keiner solchen Eingewöhnungsphase.

Erwartungskonformes und konsistentes Systemverhalten
Das Assistenzsystem muss einem tatsächlich vorhandenen Unterstützungsbedarf bzw. Wunsch des Fahrers wirksam gerecht werden und in erwarteter Weise funktionieren. In aus Fahrersicht ähnlichen Situationen muss sich das System auch weitgehend ähnlich verhalten. Maßgeblich ist hier – nicht nur unter Aspekten der Produkthaftung – die berechtigte Kundenerwartung.

Einfaches „Bedienen“, klares Anzeigekonzept
Der Fahrer muss das System schnell aktivieren und deaktivieren können und jederzeit klar über den aktuellen Status informiert sein. Soweit das Systemverhalten konfigurierbar ist, muss dies – entsprechend der Häufigkeit von vorzunehmenden Veränderungen – ebenfalls einfach und eindeutig möglich sein.

Eingriffe nur bei sicher erkannter Unfallgefahr
In kritischen Situationen eingreifende Systeme werden nur ausgelöst, wenn eine gewisse Unfallwahrscheinlichkeit sicher erkannt worden ist. Die Rate fehlender Auslösungen ist zu minimieren, womit ein hoher Anspruch an Sensorik und Signalverarbeitung zur zuverlässigen Situationsbewertung verbunden ist. Da Falschauslösungen größere Nachteile mit sich bringen können als fehlende Auslösungen, sollte das System jedoch im Zweifelsfall nicht eingreifen.

Wirksamkeit im realen Straßenverkehr
Assistenzsysteme müssen Komfort und Sicherheit unter Praxisbedingungen nachweislich verbessern. Dazu müssen – auch schon in frühen Entwicklungsphasen – Nutzungsverhalten und Systemleistung in allen relevanten Situationen in Probandenversuchen objektiv bewertet und menschbezogen optimiert werden.

Es wird deutlich, dass es sich hierbei um eine Zieldimension handelt, die nur in einer Gesamtfahrzeug-Umgebung bewertet werden kann – es muss immer das Gesamtsystem aus Fahrer, Fahrzeug und Umgebung betrachtet werden.

6.2 Anforderungen an Bewertungsverfahren

Grundsätzlich müssen Messungen, d. h. Abbildungen von Realitäten auf abstrakten Bezugssystemen, zur Sicherstellung der Übertragbarkeit die Hauptgütekriterien Objektivität, Reliabilität und Validität erfüllen [3]:

- Objektivität: Die Messung muss so weit wie möglich unabhängig von in der Person des Mes-

senden liegenden Einflüssen erfolgen, sodass verschiedene, unabhängig voneinander messende Personen zu gleichen Ergebnissen kommen.
- Reliabilität: Die Messung muss unter gleich bleibenden Bedingungen reproduzierbar sein, was nicht nur den methodenbezogenen Aspekt der Datenerhebung sondern auch zeitliche Veränderungen am zu Messenden, z. B. bei Probanden (Merkmalsfluktuation, intraindividuelle Streuung), betrifft.
- Validität: Die Messung muss in einem möglichst hohen Grad dasjenige Merkmal erfassen, über das Aussagen gewünscht werden.

Nach [4] ergeben sich darüber hinaus insbesondere in der Feldforschung Anforderungen an Messmethoden aus den folgenden Nebengütekriterien:

- Zumutbarkeit: An Datenerhebungen beteiligte Probanden sollten nicht in (subjektiv) unzumutbare Situationen gebracht werden.
- Ökonomie: Die Messmethoden müssen ein vernünftiges Verhältnis zwischen zeitlichem und finanziellem Aufwand und erhobenem Datenwert erzielen.
- Rückwirkungsarmut: Die Messmethoden selbst dürfen nur äußerst geringe Auswirkungen auf das zu Messende ausüben.

Außerdem und nicht zuletzt müssen folgende Kriterien berücksichtigt werden:

- Sicherheit: Die Sicherheit, d. h. die Unversehrtheit aller betroffenen Personen sowie des eingesetzten Materials (Versuchsfahrzeuge, Messtechnik) darf durch die Messungen nicht beeinträchtigt werden.
- Datenschutzrecht: Alle Daten dürfen nur mit dem ausdrücklichen Einverständnis der betroffenen Personen erhoben werden. Erhobene Daten dürfen in Publikationen nicht namentlich zugeordnet werden.

Kollektive

Neben den im Entwicklungsablauf regelmäßig stattfindenden Versuchen mit Experten als Fahrern sind Versuche mit „Normalfahrern" erforderlich, um Daten über Wirksamkeit und Akzeptanz von Funktionen und Systemgestaltungen bei der Grundgesamtheit (Nutzerpopulation aus Kunden und anderen Fahrern) zu gewinnen. Größe und Zusammensetzung der Stichproben entscheiden dabei über die Aussagekraft der Versuchsergebnisse und deren Übertragbarkeit auf die Zielgruppe. Stichproben sollten bezüglich der für die Versuchsfragestellung relevanten individuellen Merkmale repräsentativ sein, d. h. die Häufigkeit der Eigenschaften, Fähigkeiten, Fertigkeiten und Bedürfnisse sollte im untersuchten Kollektiv die gleiche Verteilung wie in der Zielgruppe aufweisen.

Akzeptanz hängt stark von der Erfüllung der produktbezogenen Erwartungen und Bedürfnisse ab und muss für die Zielgruppe der Käufer bewertet werden. Dazu sind möglichst genau die relevanten Merkmale *der Kunden* in geeigneter Ausprägungsbreite im Kollektiv abzubilden. Bei vielen sicherheitsbezogenen Fragestellungen geht es dagegen eher um die Anpassung der Technik an Fähigkeiten und Fertigkeiten *des Menschen* als Autofahrer. Die Zusammenstellung der Kollektive orientiert sich hier also eher an diesen Dimensionen der individuellen Leistungsvoraussetzungen.

Wenn die relevanten Merkmale noch nicht hinreichend bekannt sind, könnte man ausreichend große Zufallsstichproben aus der Nutzerpopulation ziehen. Angesichts der finanziellen und zeitlichen Rahmenbedingungen wird man jedoch in der Regel mit kleineren Kollektiven arbeiten, die zudem aus einem Milieu zusammengestellt werden (z. B. Werksangehörige oder Studierende). Dabei müssen die vermutlich relevanten individuellen Merkmale zumindest mit gleicher Häufigkeit in allen möglichen Kombinationen vertreten sein (siehe Gl. 6.1) [5]:

$$n \geq \prod_{i=1}^{k} n_i \tag{6.1}$$

Rechnet man also z. B. mit Einflüssen aus den drei Eigenschaften Alter (n_1 = 3 Ausprägungen jung, mittel, alt), Körpergröße (n_2 = 3 Ausprägungen klein, mittel, groß) und Fahrerfahrung mit einem speziellen Produkt (n_3 = 2 Ausprägungen ja, nein), so ergibt sich eine Mindestzahl von $3 \cdot 3 \cdot 2 = 18$ Probanden. Um statistisch belastbare Aussagen ableiten zu können, ist jede Kombination mit drei bis zehn Probanden abzudecken. Wesentliche Eingangsgrößen zur Festlegung des Stichprobenumfangs sind die Qualität der erhobenen Daten (Skalenniveau), die geforderte Genauigkeit der Ergebnisse sowie die zugelassene Irrtumswahrscheinlichkeit (Formeln und Beispiele bei [5]).

Grundsätzlich unterscheidet man dabei zwischen abhängigen Stichproben (auch verbundene Stichproben oder „within subject design") und unabhängigen Stichproben (unverbunden bzw. „between subject design"). Steht der Vergleich verschiedener Ausprägungen einer Systemauslegung im Vordergrund, so wird man abhängige Stichproben einsetzen. Will man dagegen die Eignung einer Auslegung für bestimmte Teile der Nutzerpopulation ermitteln, so wählt man unabhängige Stichproben.

Zum Erreichen statistisch signifikanter Ergebnisse sind bei unabhängigen Stichproben grundsätzlich mehr Probanden nötig als bei abhängigen, da hier neben der intraindividuellen auch die interindividuelle Streuung zum Tragen kommt.

Das unvorbereitete Verhalten in kritischen Situationen lässt sich bei Probanden grundsätzlich nur einmal im Versuch bewerten, danach ergeben sich durch Antizipation weiterer, ähnlich fordernder Situationen Verhaltensanpassungen aus erhöhter Wachsamkeit und/oder einem Trainingseffekt, die bei der Auswertung kaum zu isolieren sind. Dieser Tatsache ist durch Wahl eines Designs der unabhängigen Stichproben oder notfalls durch Permutation der Varianten-Reihenfolge Rechnung zu tragen.

Repräsentative Kollektive – also die Grundgesamtheit in allen relevanten Merkmalen abbildende Stichproben – sind auch angesichts der bestehenden zeitlichen und finanziellen Rahmenbedingungen bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen nur schwer zu erreichen. Man wird beim Vergleich verschiedener Systemausprägungen in der Regel mit sorgfältig aus 30 bis 50 Probanden zusammengesetzten Kollektiven auskommen. Die Absicherung eines Systems erfordert dagegen deutlich größere Stichproben mit zwischen 100 und 500 Teilnehmern.

6.3 Eingesetzte Verfahren

Jede Versuchsumgebung zeichnet sich durch spezifische Vor- und Nachteile aus, es ist die jeweils auf die gemessen an Fragestellungen und Entwicklungsfortschritt am besten geeignete Umgebung zu wählen. Eine effiziente Optimierung und Absicherung von Innovationen wird immer aus einer Mischung von Versuchen an Simulatoren, auf Testgeländen und im realen Straßenverkehr bestehen.

6.3.1 Versuche an Fahrsimulatoren

Vorteile:

- genaue Einstellbarkeit und hohe Reproduzierbarkeit zu bewertender Szenarien
- bereits in frühen Entwicklungsphasen einsetzbar
- große Variationsbreite von Umgebungsbedingungen (Fahrsituationen) und Systemparametern
- effektiv gefahrlose Darstellung kritischer Situationen

Nachteile:

- Simulatorspezifische Artefakte wie z. B. Veränderungen des Fahrerverhaltens durch eingeschränktes Gefährdungsbewusstsein und wahrnehmungsphysiologische Einschränkungen der Fahrsimulation (Bild- und Bewegungssystem)
- Aufwand durch Betrieb von Hard- und Software, Szenariengestaltung und Abbildung von Fahrzeugen und Systemen (in frühen Entwicklungsphasen sind meist nur generische Modelle verfügbar)
- Ausfall von Probanden aufgrund von Kinetose („Simulatorkrankheit“ oder „motion sickness“, zur Analyse und Prophylaxe siehe [6])
- geographische Lage des Simulators kann die Kollektivzusammensetzung beeinflussen

Beispiel für einen dynamischen Fahrsimulator
Der Daimler-Fahrsimulator [7] wurde 1985 in Berlin in Betrieb genommen. Die erste Ausführung verfügte über ein Bewegungssystem mit einem hydraulischen Hexapod (6 Freiheitsgrade), das speziell für diesen Simulator konzipiert worden war und seinerzeit den weltweit größten Bewegungsraum ermöglichte. Der sphärische Dom enthielt sechs CRT-Projektoren, die ein 180° mal 30° großes Sichtfeld vor einer realen Fahrzeugkabine produzierten. Zur besseren Darstellung der Querdynamik wurde in einer Modernisierung 1993 das Bewegungssystem erweitert: Das Sechsbein wurde auf einem Querschlitten befestigt, der von einem Hydraulikzylinder um ±2,8 m verfahren werden kann (**Bild 6-1**).

Eine weitere Überarbeitung erfolgte 2004 mit dem Austausch der Hexapod-Aktoren gegen neue, reibungsarme, hydrostatisch gelagerte. Zusammen mit der neuen digitalen Regelung wurde so eine deutlich bessere Bewegungsdarstellung in erweitertem Frequenzbereich möglich. Die Echtzeitsimulation besteht aus einem Intel-basierten Mehrprozessoren-Computer und dem Echtzeit-Betriebssystem RedHawk Linux. Die Ansteuerung der ganzen Simulationsumgebung einschließlich aller Software-Module erfolgt über eine graphische Nutzerschnittstelle (GUI) im überarbeiteten Kontrollraum (**Bild 6-1**). Das ursprüngliche Bildsystem wurde durch ein PC-Cluster und kommerzielle CRT-Projektoren ersetzt und das Sichtfeld auf 230° mal 45° nach vorne und 58° mal 28° nach hinten vergrößert. Zusammen mit einem kleinen LCD-Display im rechten Außenspiegel ergibt sich eine sehr realitätsnahe Situationsdarstellung in einer erhöhten Auflösung von 1600 mal 1200 Pixeln.

Zur effizienten Vorbereitung neuer Versuche auch bei laufenden Untersuchungen im dynamischen

Bild 6-1
Der Daimler-Fahrsimulator in Berlin

Simulator wird ein Vorbereitungssimulator genutzt. Er basiert auf identischer Hard- und Software, verfügt jedoch über kein Bewegungssystem, und das Umgebungsbild wird lediglich einkanalig auf einen flachen Bildschirm vor die Fahrzeugkabine projiziert. Szenarien können hier optimiert und in einen geeigneten Ablauf gebracht werden. Er ist auch für Untersuchungen geeignet, bei denen die Bewegungsdarstellung nur eine geringe Bedeutung hat, z. B. in bestimmten Bewertungen von Bedien- und Anzeigekonzepten.

6.3.2 Versuche auf Testgeländen (kontrolliertes Feld)

Vorteile:

- realitätsnahe Umgebung: Probanden fahren ein echtes Fahrzeug ohne Einschränkungen bei Sicht und Fahrzeugdynamik, nur geringe Einschränkungen des Gefährdungsbewusstseins
- große geographische Flexibilität: Versuche können an unterschiedlichen Orten stattfinden (z. B. in Zielmärkten)

Nachteile:

- bzgl. der Verkehrssituation nur einfache Szenarien realisierbar
- eingeschränkter Geschwindigkeitsbereich (abhängig u. a. von der Flächengeometrie)
- hoher Aufwand zur Darstellung von effektiv gefahrlosen, aber für den Fahrer subjektiv kritischen Situationen

6.3.3 Versuche im realen Straßenverkehr (Feldversuche)

Vorteile:

- Tests unter Praxisbedingungen möglich:
  - realistische Umgebung
  - freies Fahren ohne zusätzliche Fahraufgaben bzw. Einschränkungen möglich, damit kann das Nutzungsverhalten einzelner Assistenzfunktionen analysiert werden
- größte geographische Flexibilität: Versuche können an allen Orten stattfinden
- Absicherungsdaten mit höchster Validität: Fahrzeug und Assistenzsysteme können im Serienstand unter realen Bedingungen erprobt werden

Nachteile:
- systematische Variation von Faktoren sehr aufwendig
- keine reproduzierbare Vorgabe einzelner Szenarien möglich
- erst spät im Entwicklungsprozess einsetzbar
- ggf. Zusatzaufwand für spezielle Sicherheitsvorrichtungen bei Einsatz von Vorserienfahrzeugen

Während die intendierten Wirkungen von Sicherheitssystemen zunächst in Fahrsimulatorstudien und ggf. später anhand von realen Unfalldaten bewertet werden können, müssen Tests auf mögliche Nebenwirkungen unter möglichst praxisnahen Bedingungen im Feld stattfinden. So kann z. B. nur mit geeigneten Daten aus Feldversuchen die Minimierung der Falschalarm-Rate von eingreifenden Systemen erfolgen. Realversuche erlauben außerdem eine genaue Analyse des Nutzungsverhaltens sowie der Akzeptanz neuer Systeme.

6.4 Exemplarische Anwendungen

Im Folgenden werden einige Beispiele für Versuche zur Bewertung von Assistenzfunktionen in einem Fahrsimulator, auf einem Testgelände und im realen Straßenverkehr gegeben.

6.4.1 Bewertung von Sicherheitssystemen am Fahrsimulator

Viele Auffahrunfälle und Kollisionen mit schwächeren Verkehrsteilnehmern könnten durch eine Ausnutzung des technisch-physikalischen Verzögerungspotenzials verhindert bzw. in ihrer Schwere gemindert werden. Aus der Unfallursachenforschung ist bekannt, dass viele dieser Auffahrunfälle auf folgende menschliche Faktoren zurückgeführt werden können:
- der Fahrer reagiert in einer kritischen Situation zwar schnell aber zu zaghaft
- der Fahrer schätzt die Verkehrssituation falsch ein (z. B. die Verzögerung des Vorausfahrers) und reagiert zu spät
- der Fahrer reagiert z. B. aufgrund von Ablenkung gar nicht.

Da sich zur reproduzierbaren Darstellung von Notsituationen der Fahrsimulator am besten eignet, wurden dort 1992 umfangreiche Probandenversuche zum Fahrerverhalten in kritischen Situationen durchgeführt. Ein Ergebnis war, dass die Mehrzahl der Versuchspersonen zwar schnell, aber oft nicht kraftvoll genug aufs Bremspedal tritt. Die typische Reaktion zeigt **Bild 6-2**: Da das Anfordern der maximalen Verzögerung für die meisten Autofahrer ungewohnt ist, wird mit zügiger Betätigung des Bremspedals zunächst eine hohe aber für kritische Situationen nicht ausreichende Verzögerung bewirkt. Wenn sich diese eingestellt und als unzureichend erwiesen hat, treten die Fahrer nach – oft ist das aber schon zu spät für eine Vermeidung des Unfalls.

Diese Erkenntnis führte zur Erfindung und Entwicklung des Bremsassistenten [8], der aus der Geschwindigkeit, mit der das Bremspedal betätigt wird, auf das Vorliegen einer Notsituation schließt und innerhalb von Sekundenbruchteilen die maximale Bremskraftverstärkung aufbaut. In umfangreichen nachfolgenden Studien wurden die Grenzen der „normalen“ Bremspedalbetätigungsge-

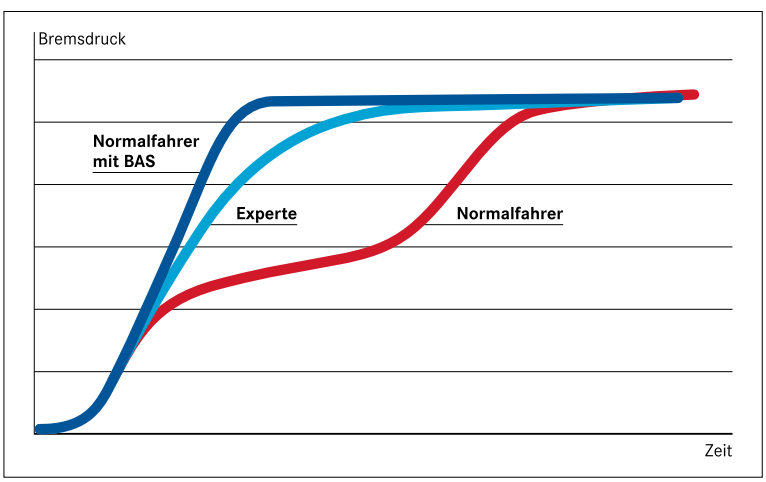


Bild 6-2
Bremsverhalten in kritischen Situationen

schwindigkeit ermittelt, um Auslöseschwellen für diese Assistenzfunktion festzulegen, die bei hoher Wirksamkeit in tatsächlich kritischen Fahrsituationen auch bei sportlicher Fahrweise keine falschen Auslösungen ergeben.

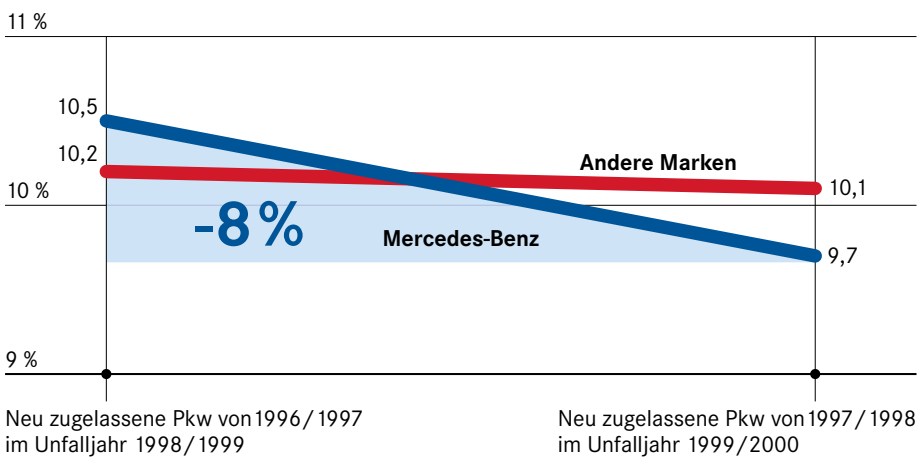
Die Wirksamkeit dieser Technik ist inzwischen auch durch Auswertungen repräsentativer Unfalldaten bestätigt worden: Eine vom Statistischen Bundesamt zur Verfügung gestellte, anonymisierte und repräsentative 50 %-Stichprobe aller Unfälle mit Personen- und schwerem Sachschaden wurde ausgewertet, um Effekte der Einführung des Bremsassistenten (BAS) zu ermitteln. Es zeigt sich, dass die auf die Anzahl der zugelassenen Fahrzeuge bezogene Unfallquote für Auffahrunfälle seit der serienmäßigen Einführung des BAS um 8 % zurückging (**Bild 6-3**).

Dieses 1996 eingeführte System kann jedoch nicht nur Auffahrunfälle verhindern, sondern auch einen wirksamen Beitrag zum Fußgängerschutz leisten. Das zeigte eine weitere Untersuchung mit unabhängigen Stichproben im Fahrsimulator. Die untersuchten Szenarien wurden aus dem realen Unfallgeschehen abgeleitet: Eine Auswertung von GIDAS-Daten zeigte, dass 74 % aller Kollisionen mit Fußgängern bei Geschwindigkeiten bis zu 50 km/h stattfinden [9]. In 89 % aller Fälle ereignen sich die Unfälle bei Geradeausfahrt. So wurde zum Nachweis der unfallvermeidenden Wirkung des BAS ein typisches Szenario im Simulator dargestellt: 55 Autofahrerinnen und Autofahrer fuhren mit Tempo 50 durch eine Ortschaft, als plötzlich – aufgrund von Gegenverkehr schwierig wahrzunehmen – ein Kind auf die Fahrbahn lief. Dabei wurde die Möglichkeit zum Ausweichen bewusst eingeschränkt, um vorrangig Aussagen zum Bremsverhalten zu erhalten. Gefahren wurde mit einer C-Klasse (BR 203), variiert wurde die Verfügbarkeit des BAS. Die hinsichtlich der Versuchsziele nicht informierten Probanden lösten zu 65 % den Bremsassistenten aus, was zu dem zentralen Testergebnis führte: Die Unfallquote lag bei verfügbarem Bremsassistenten mit 26 % um 32 Prozentpunkte niedriger als ohne BAS (58 %). Bei Auslösung des BAS konnte der Unfall immer verhindert werden.

Auch dieser im Fahrsimulator gefundene Effekt wurde durch Daten des realen Unfallgeschehens bestätigt: Nach Einführung des BAS als Teil der Serienausstattung für PKWs von Mercedes-Benz ging der Anteil der schweren Unfälle an allen Fußgängerunfällen mit 13 % deutlich zurück (**Bild 6-4**). Zu weiteren Bewertungen der Effekte anhand von Unfalldaten siehe [10] und [11].

Radarbasierte Bremsassistenz

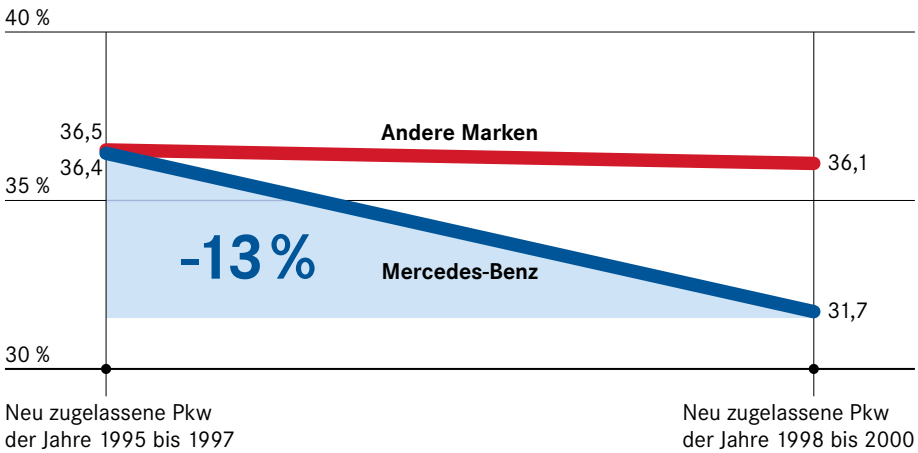
Im Jahr 2005 wurde bei Mercedes-Benz als Ergänzung zum BAS der sog. BAS PLUS eingeführt, ein erweiterter Bremsassistent, der mithilfe von radar-



Unfallquote je 10 000 Neuzulassungen: Pkw als Hauptverursacher beim Zusammenstoß mit vorausfahrendem Fahrzeug

Quelle: Auswertung der anonymisierten 50-Prozent-Stichprobe der Unfallstatistik des Statistischen Bundesamtes für die Unfalljahre 1998 bis 2003 durch Mercedes-Benz

Bild 6-3: Verursachte Auffahrunfälle je 10 000 neu zugelassener Fahrzeuge



Prozentualer Anteil der Unfälle mit Getöteten und Schwerverletzten an allen Unfällen beim Überschreiten der Fahrbahn

Quelle: Auswertung der anonymisierten 50-Prozent-Stichprobe der Unfallstatistik des Statistischen Bundesamtes für die Jahre 1998 bis 2003 durch Mercedes-Benz

Bild 6-4: Anteil der Unfälle mit Getöteten und Schwerverletzten an allen Unfällen beim Überschreiten der Fahrbahn

basierten Abstandsinformationen die Fahrerbremsung situationsgerecht verstärkt. Ist der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug zu gering, leuchtet ein rotes Warnsymbol auf. Droht ein Auffahrunfall, so ertönt außerdem ein akustisches Signal des Abstandswarnsystems, das damit den Autofahrer zunächst bei der Einschätzung der Gefahrensituation unterstützt. Zusätzlich steht die zur Vermeidung einer Kollision berechnete Bremskraftunterstützung auch dann unmittelbar zur Verfügung, wenn der Autofahrer nicht kräftig genug auf das Bremspedal tritt und eine Kollisionsgefahr besteht. Der Bremsdruck wird dabei fortlaufend, je nach Geschwindigkeit und Abstand, den Erfordernissen der Situation entsprechend eingeregelt, man spricht hierbei von einer Zielbremsung auf das erkannte Objekt. Dabei wird aus Rücksicht auf den folgenden Verkehr nicht mehr Bremskraft zur Verfügung gestellt als in der jeweiligen Situation nötig. Nur falls erforderlich, erhöht das System die Bremskraft bis zur Vollbremsung.

Zur Analyse der Wirksamkeit eignet sich auch hier der Fahrsimulator am besten, da die Bewältigung von drei im realen Verkehrsgeschehen besonders häufigen Unfallsituationen reproduzierbar jeweils mit und ohne BAS PLUS untersucht werden sollte (der konventionelle BAS stand allen 110 Probanden jederzeit zur Verfügung): In zwei Situationen verschärfte sich die Verzögerung des Vorausfahrenden, sodass sich aus einer zunächst harmlosen Verzögerung eine Vollbremsung entwickelte (**Tabelle 6-1**). In einer weiteren Situation wechselte

Tabelle 6-1: Szenarien zur Bewertung eines radarbasierten Bremsassistenten

Nr.	Straßentyp	Geschwindigkeit	Ausgangsabstand zum Vorfahrer	Szenario
1	Autobahn	130 km/h	1,45 – 1,55 s	Fahrt auf der linken Fahrbahn, ein Fahrzeug schert von der rechten Fahrspur direkt vor das Fahrzeug des Probanden
2	Autobahn	130 km/h	1,45 – 1,55 s	Folgefahrt: Vorausfahrer bremst 0,7 s lang mit 1 m/s^2 und erhöht die Verzögerung dann auf 8,5 m/s^2
3	Landstraße	80 km/h	1,45 – 1,55 s	Folgefahrt: Vorausfahrer bremst 1,0 s lang mit 1 m/s^2 und erhöht dann die Verzögerung auf 9,0 m/s^2

Tabelle 6-2: Situationsbewältigung in Abhängigkeit von der Brems-Unterstützung (110 Versuchspersonen)

Situation	Unfallquote		Aufprallgeschwindigkeit	
	Mit BAS	Mit BAS PLUS	Mit BAS	Mit BAS PLUS
1	20 %	4 %	30 km/h	19 km/h
2	55 %	19 %	60 km/h	45 km/h
3	44 %	6 %	46 km/h	26 km/h

ein Fahrzeug plötzlich von der Nebenspur direkt vor das Fahrzeug der Probanden.

In allen Situationen zeigte sich die größere unfallvermeidende Wirkung des vorausschauenden BAS PLUS: Situation 1 mit dem sehr plötzlich (bei einer auf das Störfahrzeug bezogenen *Time to collision* = 2 s) auftretenden Hindernis (Einscherer) führt bei den meisten Probanden zum Auslösen des konventionellen Bremsassistenten und damit bei 80 % zum unfallfreien Bewältigen der Situation. Mit BAS PLUS bleiben 96 % unfallfrei. Die beiden anderen Situationen mit der für den Fahrer schwieriger wahrzunehmenden Entwicklung einer Notbremssituation zeigen noch größere Verbesserungen durch den radarbasierten Bremsassistenten: Hier sinken die Unfallquoten von 55 bzw. 44 % auf nur noch 19 bzw. 6 %. Über alle betrachteten Situationen ergibt sich eine Verringerung der Unfallquote im Vergleich zwischen BAS (44 %) und BAS PLUS (11 %) um 75 %. Daneben wird auch der die Unfallschwere mildernde Effekt deutlich: Auch wenn sich mit BAS PLUS eine Kollision nicht vermeiden ließ (zu späte Bremsreaktion des Fahrers), so ist doch die Aufprallschwere deutlich niedriger (**Tabelle 6-2**).

Da aus der Praxis bekannt ist, dass Autofahrer in kritischen Momenten nicht immer reagieren, beispielsweise weil sie abgelenkt sind, wurde als nächste Assistenzfunktion eine autonome Teilbremsung eingeführt. Die zeitliche Analyse einer typischen Auffahrsituation zeigt, wie die Assistenzsysteme eine unfallträchtige Situation erkennen, den Autofahrer warnen, ihn unterstützen oder bei akuter Gefahr selbst eingreifen (**Bild 6-5**). Die autonome Teilbremsung (PRE-SAFE®-Bremse) ist im Geschwindigkeitsbereich von 30 bis 200 km/h aktiv

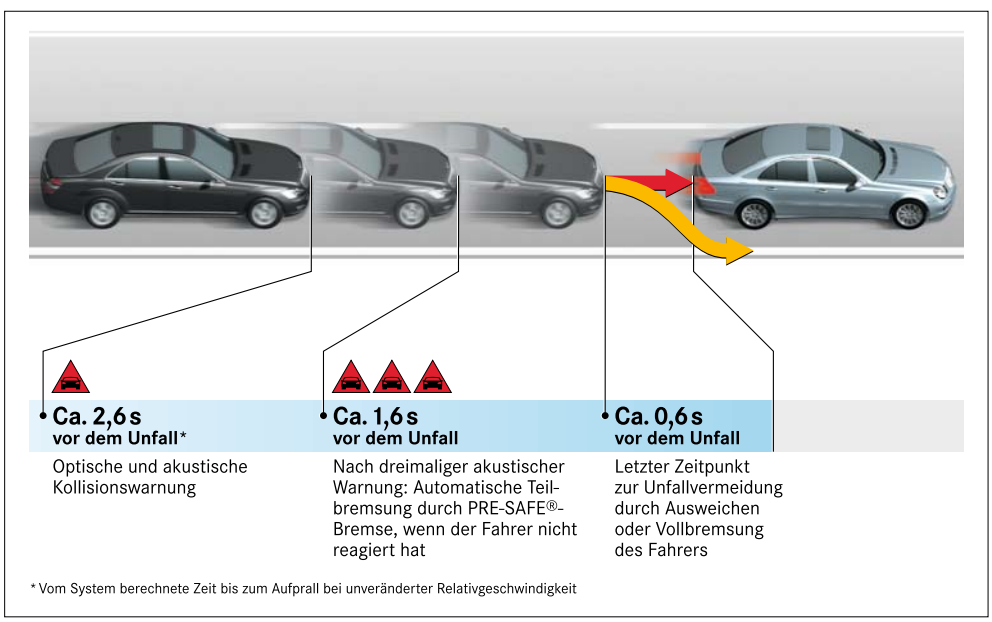

Ca. 2,6 s
vor dem Unfall*
Optische und akustische Kollisionswarnung
Ca. 1,6 s
vor dem Unfall
Nach dreimaliger akustischer Warnung: Automatische Teilbremsung durch PRE-SAFE®-Bremse, wenn der Fahrer nicht reagiert hat
Ca. 0,6 s
vor dem Unfall
Letzter Zeitpunkt zur Unfallvermeidung durch Ausweichen oder Vollbremsung des Fahrers
* Vom System berechnete Zeit bis zum Aufprall bei unveränderter Relativgeschwindigkeit

Bild 6-5: Zeitlicher Ablauf der Unterstützung in einer Situation mit Auffahrunfall-Gefahr

Bild 6-6
Ablenkungs-Szenario auf einer Landstraße

und kann ebenso wie BAS PLUS im Geschwindigkeitsbereich bis ca. 70 km/h auch bei Annäherung an als relevant erkannte, stehende Objekte mit einer Bremsunterstützung bzw. -aktivierung reagieren. Die autonome Teilbremsung kann auf zweierlei Weise Wirkung entfalten: Abgelenkte Autofahrer können wieder aufmerksam und zum sofortigen Reagieren veranlasst werden, um den Unfall zu verhindern. Dabei unterstützen auch Bremsassistent PLUS (baut sofort den für die Fahrsituationen berechneten Bremsdruck auf) und ESP® (stabilisiert das Fahrzeug beim schnellen Ausweichen). Ist der Zusammenstoß unvermeidbar, kann die autonome Teilbremsung dazu beitragen, die Kollisionsgeschwindigkeit und damit die Unfallfolgen zu verringern.

Die Wirksamkeit der autonomen Teilbremsung wurde in einem Versuch mit 70 Autofahrerinnen und Autofahrern am Fahrsimulator von Daimler bewertet. Die besondere Herausforderung für dieses Versuchskonzept bestand darin, mit der Teilbremsung die letzte Stufe in einer Kette von Assistenzfunktionen – nach Warnung und konventionellem bzw. radarbasiertem BAS PLUS – zur Geltung bringen zu können. Dazu mussten die Probanden so stark abgelenkt werden, dass eine Nichtbeachtung der Warnungen wahrscheinlich wurde. Realisiert wurde nach mehreren wenig erfolgreichen Versuchen mit anderen Ablenkungen wie z. B. der zeitgesteuerten Auslösung einer Nebenaufgabe (Wechseln einer CD) oder einer kognitiven Nebenaufgabe (Rechenaufgabe) ein einfaches Unfallszenario auf der Gegenfahrspur einer Landstraße (**Bild 6-6**). Am linken Fahrbahnrand stehende Fahrzeuge, die dort verunglückt waren, sorgten zusammen mit Fußgängern auf der Straße und einem Polizeifahrzeug sehr wirksam für eine kurze Ablenkung. Genau in diesem Moment bremste das vorausfahrende Auto – zuerst nur leicht, dann plötzlich mit einer Vollbremsung.

Die Mehrzahl der Testteilnehmer (53 %) reagierte so schnell auf die optischen und akustischen Warnungen, dass der Unfall mit Unterstützung des Bremsassistenten PLUS verhindert werden konnte. 17 % der Testteilnehmer reagierten erst aufgrund der autonomen Teilbremsung und traten selbst so schnell aufs Bremspedal, dass der Unfall mithilfe von PRE-SAFE®-Bremse und Bremsassistent PLUS verhindert wurde. 30 % der Autofahrer waren durch die Szene auf der Gegenfahrbahn so stark abgelenkt, dass nicht rechtzeitig gebremst wurde. In diesen Fällen bewirkte die autonome Teilbremsung eine deutliche Verringerung der Aufprallgeschwindigkeit und damit der Unfallschwere: Die Aufprallgeschwindigkeit verringerte sich durch die autonome Teilbremsung von durchschnittlich 45 auf 35 km/h. Das bedeutet eine um 40 % reduzierte Crash-Energie und damit ein deutlich vermindertes Verletzungsrisiko für Fahrer und Beifahrer.

Zur Abschätzung der unfallmildernden Wirkung dieses Systems im realen Verkehrsgeschehen hat der ADAC in eigenen Tests die Geschwindigkeitsreduktion durch die autonome Teilbremsung in Versuchen auf dem Testgelände gemessen und die Auswirkungen auf den Insassenschutz in Schlittenversuchen bewertet. Bei einer Ausgangsgeschwindigkeit von 50 km/h führte die autonome Fahrzeugreaktion auf ein stehendes Hindernis im Durchschnitt zu einer Verringerung der Kollisionsgeschwindigkeit auf 37,5 km/h. Die Auswirkungen auf den Insassenschutz sind in [12] und [13] beschrieben.

6.4.2 Bewertung einer Sicherheitsfunktion in Versuchen auf einem Testgelände

Wie bereits erwähnt besteht eine Ursache für Auffahrunfälle im verspäteten menschlichen Erkennen einer Vollbremsung des Vorausfahrenden. Zur bes-

seren Erkennung von Notbremsungen und damit zur Verkürzung der Reaktionszeit des Fahrers kann auch das rückwärtige Signalbild genutzt werden. Als Alternativen bieten sich das Zuschalten des Warnblinkers und das schnelle Blinken der Bremsleuchten an. Zur vergleichenden Bewertung der Wirkung dieser neuen Ansätze unter so realitätsnahen Bedingungen wie versuchstechnisch möglich wurden Versuche auf einem Testgelände durchgeführt [14].

Die Aufgabe der 40 Probanden bestand darin, einem vorausfahrenden Fahrzeug in einem Abstand von 50 m zu folgen. Die Abstandshaltung wurde in einer Eingewöhnungsphase ausreichend geübt. Nach mehreren unkritischen Fahrmanövern löste der Experte im vorausfahrenden Fahrzeug bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h eine BAS-Bremsung aus. Die Reaktionszeit des Probanden (Zeit zwischen der Ansteuerung der Bremsleuchten beim Vorfahrer und dem Betätigen des Bremspedals beim Probanden) wurde durch telemetrische Datenübertragung bestimmt. Untersucht wurden neben dem konventionellen Bremslicht auch zwei neue Signalbilder: die Auslösung des Warnblinkers sowie die Auslösung schnell blinkender Bremsleuchten. Zur Normierung der im Versuch erhobenen Reaktionszeiten wurde für jeden Probanden nach dem Versuch das individuelle Reaktionsvermögen bewertet. Im stehenden Fahrzeug mussten die Probanden das Bremspedal betätigen, sobald die Bremsleuchten eines im Abstand von 40 m stehenden Fahrzeugs aufleuchteten. Aus fünf Wiederholungen wurde eine individuelle Reaktionszeit gemittelt, die zwischen 0,3 s und 0,75 s lag; der häufigste Wert betrug 0,4 s. Ausgewertet wurden die normierten Reaktionszeiten (Reaktionszeit im Versuch – mittlere Reaktionszeit im Stand). **Bild 6-7** zeigt die Mittelwerte mit Standardabweichung im Vergleich. Blinkende Bremsleuchten führten zu signifikant schnelleren Reaktionen als konventionelle Bremsleuchten und Warnblinker. Der Vorteil einer um 0,2 s früheren Reaktion wird deutlich in einer Betrachtung des Anhaltewegs: Aus der Testgeschwindigkeit von 80 km/h verkürzt er sich dank blinkender Bremsleuchten beim Vorfahrer um 4,40 m.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde das sog. Adaptive Bremslicht bei Mercedes-Benz eingeführt, das bei Notbremsungen blinkende Bremsleuchten und zusätzlich bei Notbremsungen bis in den Stillstand die automatische Auslösung der Warnblinker umfasst. Die Kriterien für Notbremsungen wurden aus Feldversuchen abgeleitet (**Bild 6-8**). Unterhalb von 150 km/h müssen zur Aktivierung 7,5 m/s^2 erreicht werden. Bei höheren Geschwindigkeiten wurde eine linear fallende Aktivierungsschwelle realisiert, um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass Autofahrer mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit schwächer verzögern.

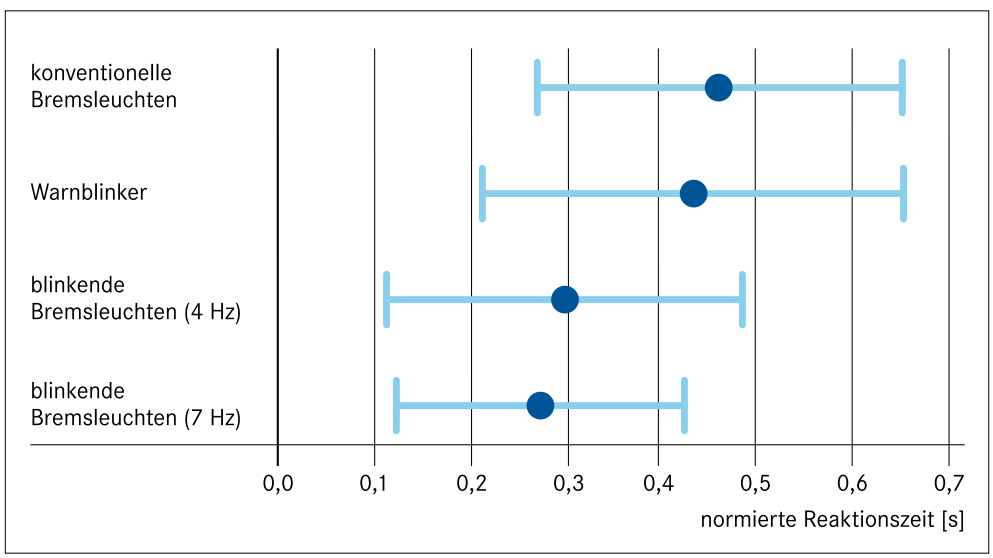


Bild 6-7: Reaktionszeiten auf verschiedene Signalbilder bei einer Vollbremsung des vorausfahrenden Fahrzeugs auf einem Testgelände (Mittelwerte und Standardabweichung), die Unterschiede zwischen den beiden Ausprägungen des blinkenden Bremslichts und dem konventionellen Signalbild sind statistisch signifikant.

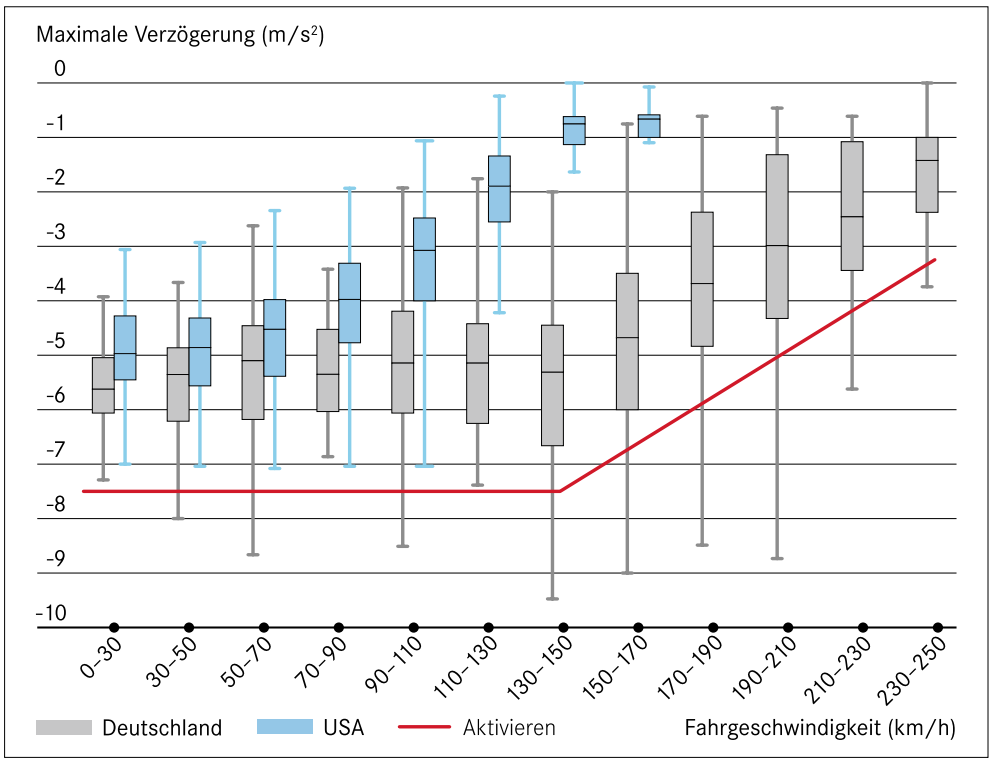


Bild 6-8: Bereiche der Verzögerung in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit (Daten aus Feldversuchen mit 48 Probanden über 94 000 km in Deutschland und 96 Probanden über 89 000 km in den USA, beide mit Fahrzeugen der Mercedes-Benz Baureihe 220), dargestellt sind jeweils Minimum, 25. Perzentil, Median, 75. Perzentil und Maximum, Ausreißer/Extremwerte werden hier nicht dargestellt, die Linie stellt die Auslöseschwelle für das Adaptive Bremslicht dar.

6.4.3 Bewertung von Assistenzfunktion in Versuchen im realen Straßenverkehr

Mit ACC wurden 1999 erstmalig selbsttätig bremsende und beschleunigende Assistenzsysteme eingeführt. Damit ergaben sich einerseits neue Potenziale für den Entlastungskomfort, andererseits ist die erstmalige und weltweite Einführung einer solchen Innovation auch mit Produkthaftungsrisiken verbunden.

Zur Bewertung des Nutzungsverhaltens und der Auswirkungen des Abstandsregeltempomaten von Mercedes-Benz (DISTRONIC) auf die Fahr- und Konditionssicherheit wurden 1998–1999 bei Daimler umfangreiche Feldversuche in Deutschland und in den USA durchgeführt. 140 interne Probanden (sämtlich Nicht-Entwickler) nutzten jeweils ein Fahrzeug für eine Dauer von 3 bis 7 Tagen. Mit einer Flotte von insgesamt 15 speziell ausgerüsteten Fahrzeugen wurden knapp 200 000 Kilometer messtechnisch dokumentiert. Die mittlere Fahrleistung der Probanden betrug in Deutschland 1960 km, in den USA 927 km. Dabei wurden fahrdynamische und systembezogene Größen kontinuierlich aufgezeichnet. Zusätzlich wurden ereignisgesteuerte Videoaufnahmen zur genaueren Situationsanalyse herangezogen. Für viele Betrachtungen wurden die Phasen der Nutzung von DISTRONIC verglichen mit den Phasen, die ohne System gefahren wurden. Dabei wurden die unmittelbar auf das Ende einer DISTRONIC-Phase folgenden 12 Sekunden noch zur Nutzungsphase gerechnet, um eventuell durch die Systemnutzung induzierte Situationsveränderungen dem System anzurechnen.

Das System wurde bezogen auf die gefahrene Strecke in den USA noch stärker genutzt als in Deutschland (42 vs. 32 %). Es konnte anhand der Versuchsdaten nachgewiesen werden, dass die Nutzung des ACC nicht mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit potenziell kritischer Fahrsituati-

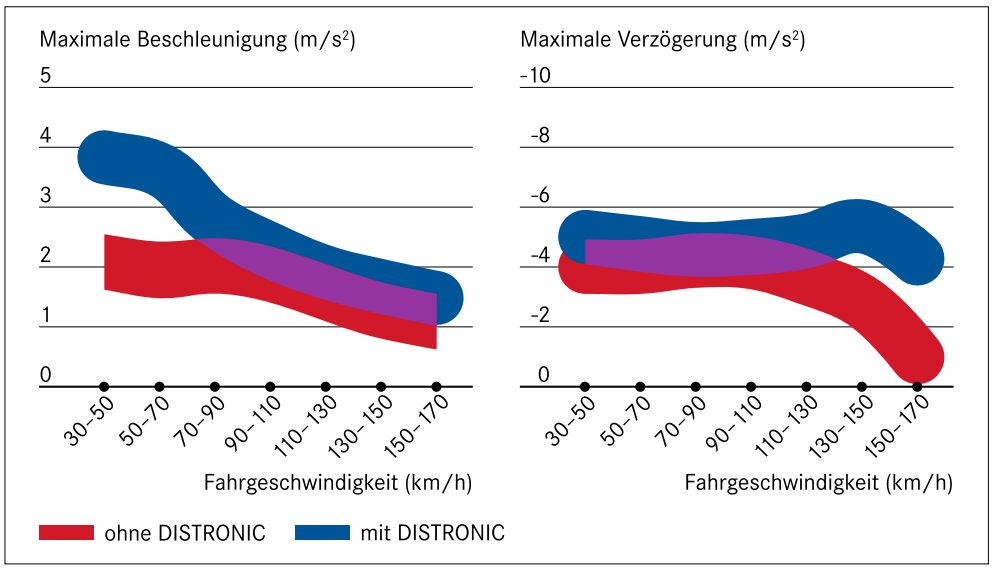


Bild 6-9: Bereiche der maximalen Beschleunigung und Verzögerung in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit und der Nutzung eines ACC (Daten aus Feldversuchen mit 140 Probanden in Deutschland und in den USA)

onen einhergeht. Vielmehr zeigen sich bei eingeschalteter DISTRONIC niedrigere Maximalwerte für Beschleunigung und Verzögerung und somit Voraussetzungen für eine gleichmäßigere Fahrweise als ohne das System (**Bild 6-9**).

Zudem vergrößerte sich bei den deutschen Probanden der Abstand zwischen 70 und 110 km/h im Durchschnitt um 29 % bei Fahrt mit aktivierter DISTRONIC. In den USA bewirkte das Assistenzsystem, dass sich der Abstand im Mittel um 13 bis 25 % vergrößerte.

Mit der Einführung der zusätzlichen Nahbereichs-Radarsensoren konnte der Funktionsumfang von ACC deutlich erweitert werden. Seitdem kann das System zwischen 0 und 200 km/h den Fahrer unterstützen und dabei auch „Stop&Go"-Situationen abdecken. In einer vergleichbaren Versuchsreihe wurde das Mercedes-Benz-System „DISTRONIC PLUS" wieder in Feldversuchen in Deutschland und den USA bewertet. Mit über 200 Probanden wurden über 450 000 Testkilometer messtechnisch dokumentiert. Die im Vergleich zum bisherigen System deutlich stärkere Nutzung spiegelt die Weiterentwicklung wider: In Deutschland wurden jetzt 51 %, in den USA 42 % der Fahrstrecke mit aktiviertem System gefahren (**Bild 6-10**).

Auch bezüglich der Sicherheit ergeben sich bei der Nutzung dieses Komfortsystems vorteilhafte Effekte: Der mittlere minimale Abstand liegt bei aktivem System in allen Geschwindigkeitsbereichen z. T. deutlich über den Werten bei Fahrt ohne aktiviertes System (**Bild 6-11**).

Quellenverzeichnis

[1] *Breuer, J.*: Fahrerassistenzsysteme: Vom Tempomat bis zum Notbremsassistenten. In: Technischer Kongress 2007 Verband der Deutschen Automobilindustrie VDA. Frankfurt: VDA 2007

[2] *Eckstein, L.*: Souveräne Interaktion mit Fahrerassistenzsystemen. In: Technischer Kongress 2008 Verband der Deutschen Automobilindustrie VDA. Frankfurt: VDA 2008

[3] *Bortz, J.*: Lehrbuch der Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. Berlin u. a.: Springer 2005

[4] *Laurig, W.; Luttmann, A.*: Planung und Durchführung von Feldstudien. In: *Rohmert, W.; Rutenfranz, J.* (Hrsg.): Die Bedeutung von Feldstudien für die Arbeitsphysiologie. Festkolloquium aus Anlaß des 75. Geburtstags von Herbert Scholz, Dortmund 10. Juni 1987. Dokumentation Arbeitswissenschaft Bd. 17, Köln: Dr. Otto Schmidt 1988

[5] *Bubb, H.*: Wie viele Probanden braucht man für allgemeine Erkenntnisse aus Fahrversuchen? In: *Landau, K.; Winner, H.*: Fahrversuche mit Probanden – Nutzwert und Risiko. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 12 Nr. 557. Düsseldorf: VDI 2003

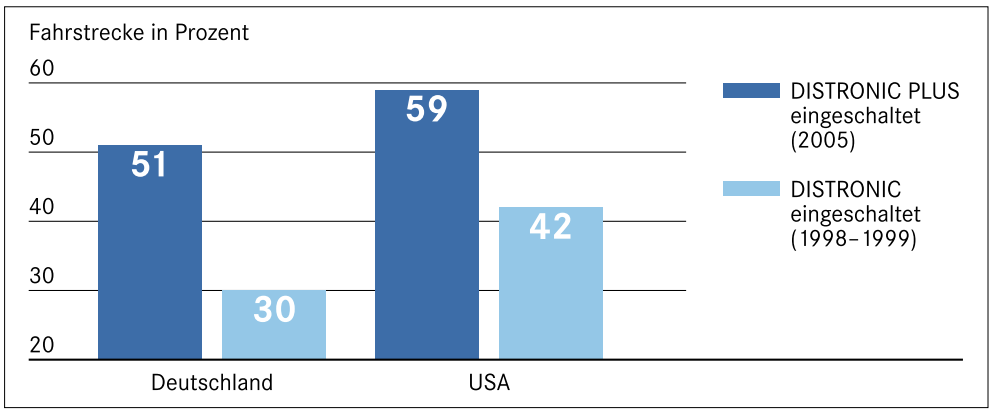


Bild 6-10: Vergleich der auf die Fahrstrecke bezogenen Nutzung verschiedener ACC-Systeme (Daten aus Feldversuchen mit 140 Probanden für DISTRONIC und 200 Probanden für DISTRONIC PLUS)

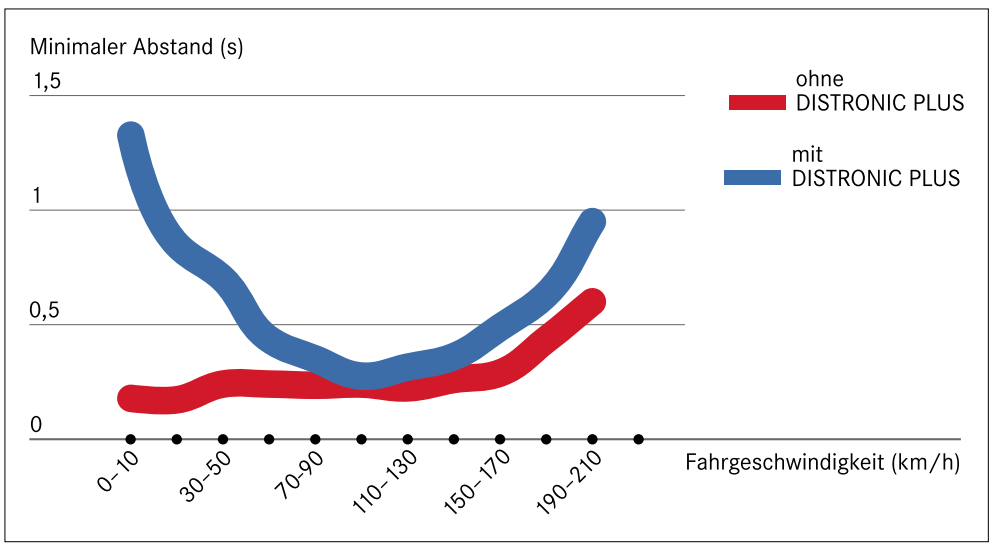


Bild 6-11: Minimaler Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit und der Nutzung eines ACC (Daten aus Feldversuchen mit 60 Probanden über 124 000 km in Deutschland)

[6] *Schlender, D.*: Simulatorkrankheit in Fahrsimulatoren. Zeitschrift für Verkehrssicherheit 54 (2) 2008, S. 74–80

[7] *Breuer, J.; Käding, W.*: Contributions of Driving Simulators to Enhance Real World Safety. In: Proceedings Driving Simulation Conference – Asia/Pacific 2006. Tsukuba: National Institute of Advanced Industrial Science and Technology 2006

[8] *Kiesewetter, W.; Klinkner, W.; Reichelt, W.; Steiner, M.*: The New Brake Assist of Mercedes-Benz. Active Support in Emergency Braking Situations. In: *Pauwelussen, J. P.* (Hrsg.): Vehicle Performance. Tayler & Francis 1999

[9] *Unselt, T.; Breuer, J.; Eckstein, L.*: Fußgängerschutz durch Bremsassistenz. (Pedestrian Protection via Brake Assistance). In: Proceedings of „Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme“, Technische Universität München, 11.–12.03.2004

[10] *Page, Y.; Foret-Bruno, J.-Y.; Cuny, S.*: Are expected and observed effectiveness of emergency brake assist in preventing road injury consistent? ESV Paper Number 05-0268

[11] *Kassaagi, M.; Bouslimi, W.; Val, C.; Bersac, J-M.; Moessinger, M.; Page, Y.*: Effectiveness of emergency brake assist in rear-end accident scenarios FISITA F2006D062

[12] ADAC: Der Crashbeweis: Die denkende Bremse hilft. motorwelt 12 2006, S. 42–43
[13] *Schöneburg, R.*: Potenzialbewertung von präventiven Insassenschutzsystemen. In: Technischer Kongress 2007 Verband der Deutschen Automobilindustrie VDA. Frankfurt: VDA 2007
[14] *Unselt, T.; Beier, G.*: Safety Benefits of Advanced Brake Light Design. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA), International Society for Occupational Ergonomics and Safety (ISOES), Federation of European Ergonomics Societies (FEES): International Ergonomics Conference. Munich, May 7th – 9th, 2003

7 EVITA – Das Prüfverfahren zur Beurteilung von Antikollisionssystemen

Jens Hoffmann, Hermann Winner

7.1 Einleitung

Bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen (FAS) für die Vermeidung von Unfällen sind geeignete Testmethoden für das Erzeugen von Bewertungen erforderlich. Für eine größtmögliche Übertragbarkeit der Versuche sind realitätsnahe und repräsentative Szenarien darzustellen. Dabei gilt bisher, dass eine Vergrößerung der Realitätsnähe mit einer enormen Vergrößerung des Aufwands einhergeht. Die Testmethoden mit Probanden für in kritischen Situationen unterstützende FAS müssen vor allem sicher für die beteiligten Versuchspersonen, aber auch reproduzierbar sein. Da bisher geeignete Verfahren fehlen, stellt dieser Test von Antikollisionssystemen in kritischen Situationen eine große Herausforderung dar.

Bei der Entwicklung von Systemen zur Kollisionsvermeidung oder Kollisionsminderung sind sowohl die Wirksamkeit als auch die Akzeptanz durch den Nutzer zu bewerten. Die Forderung nach einer hohen Wirksamkeit leitet sich ab aus dem Bestreben, die Zahl der Verletzten und Getöteten zu reduzieren. Die Akzeptanz und somit auch die Entscheidung zum Kauf von Antikollisionssystemen sind vom Nutzer abhängig.

Aufgrund der Gefahren bei der Erzeugung von realen Auffahrunfällen werden Untersuchungen bisher hauptsächlich im Fahrsimulator durchgeführt. Mit EVITA (Experimental Vehicle for Unexpected Target Approach) wird ein Mess- und Bewertungsverfahren für Antikollisionssysteme im realen Fahrversuch mit Probanden vorgestellt. Damit liegt eine Methode vor, mit der die Güte von Antikollisionssystemen beurteilt wird.

7.2 Bisher bekannte Testverfahren

Im Folgenden werden bekannte Testmethoden für das Testen von Antikollisionssystemen während Realfahrten dargestellt. Die in diesem Kapitel beschriebenen Methoden vereint, dass fahrzeugbezogene Daten zur Wirkung und Funktion von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen unter Einbeziehung von Probanden ermittelt werden können. Dazu werden kritisch erscheinende Situationen dargestellt, ohne jedoch die Versuchsbeteiligten wirklich zu gefährden.

Kassaagi et al. [1] beschreiben ein Verfahren zum Testen von Bremsassistenten (BAS) mit Probanden: Hinter einem Zugfahrzeug befindet sich ein leichter, flacher Anhänger, ähnlich einem offenem Einachser mit Pritsche. Während der Folgefahrt wird der Anhänger – überraschend für den Probanden im Folgefahrzeug – abgebremst. Durch die Reaktion des Probanden im Folgefahrzeug wird eine Kollision vermieden. Die wichtigste Bewertungsgröße ist die Kraft, mit der der Proband das Bremspedal betätigt.

DaimlerChrysler [2] verwendet ein Testverfahren für Radarsysteme, bei dem an einem vorausfahrenden Fahrzeug ein seitlicher Ausleger montiert ist. Das Folgefahrzeug fährt auf dem Fahrstreifen hinter dem Ausleger. Entsteht durch das Bremsen des vorausfahrenden Fahrzeugs eine Kollisionsgefahr, schwenkt der Ausleger kurz vor einem Aufprall nach oben, um das Fahrzeug passieren zu lassen.

Beim APIA-Demonstrator (Active Passive Integration Approach) von Continental-Teves [3] kommt das gleiche Verfahren zur Anwendung: An einem Rahmen ist ein Fahrzeugheck als Ausleger befestigt. Diese Vorrichtung klappt per Federvorspannung, ausgelöst durch einen Bediener, bei einem drohenden Aufprall nach oben.

Von Bock et al. [4] wird das Augmented Reality (AR)-Testverfahren „Vehicle in the loop“ beschrieben. Auf dem Testgelände werden dem Fahrer die Kollisionspartner per Head-Mounted-Display (HMD) eingespielt. Das Testgelände ist zur genauen Positionsbestimmung des Fahrzeugs mit GPS-Sendern ausgestattet. Über ein System zur Bestimmung der Kopfposition im Fahrzeug und weiteren Verarbeitungseinheiten wird dem Fahrer ein künstlich erzeugtes Bild zur Überlagerung der realen Szenerie dargeboten. Das künstlich erzeugte Bild enthält die Kollisionspartner.

Jansson [5] beschreibt ein Verfahren zum Darstellen von Kollisionsmanövern mit vorausfahrenden Fahrzeugen. Dazu wird das Heck des vorausfahrenden Fahrzeugs durch einen aufblasbaren Ballon dargestellt.

Bei einer Untersuchung von Schmitt et al. [6] wird eine Folgefahrsituation mit zwei Fahrzeugen und einem plötzlichen Bremsmanöver erzeugt. Der vorausfahrende herkömmliche PKW wird von einem hochtrainierten Fahrer bewegt.

Shutko [7] beschreibt ein Verfahren zum Ermitteln der Reaktionszeiten bei LKW-Fahrern. Bei der

Bild 7-1: EVITA (bestehend aus Zugfahrzeug und Dummy Target)

Vorbeifahrt an einer engen Stelle wird hinter einer Wand ein Gegenstand (Fass) auf die Straße vor den LKW gerollt. Bestimmt wird die Anzahl der Kollisionen mit der Tonne.

Im Kooperationsprojekt PRORETA (s. Kapitel 41) von drei Instituten der TU Darmstadt und Continental kamen ein seitlich gezogenes schaumstoffgefülltes Fahrzeugheck sowie ein aus einer feststehenden Tonne seitlich herausschnellender Luftschlauch zur Anwendung [8]. Dargestellt wurden plötzliche Einschermanöver vorausfahrender Fahrzeuge und Varianten eines autonomen Lenkeingriffs im Versuchsfahrzeug zum Vermeiden einer Kollision.

Einen weiteren Überblick über Testverfahren geben die Kapitel 5 und 8 sowie [9].

7.3 Das Dummy Target EVITA

Für in kritischen Situationen agierende FAS ist kein universell einsetzbares, einfaches Testverfahren für Realfahrten bekannt, bei dem Probanden ohne Einschränkungen eingesetzt werden können.

In zwei Forschungsprojekten in Kooperation mit Honda R&D Deutschland und der Forschungsinitiative „Aktiv“ wurden verschiedene Ausprägungen von Antikollisionssystemen entwickelt und bewertet. Für die Durchführung des Entwicklungsprozesses ist eine eigene Bewertungsmethode mit einem top-down-Ansatz abgeleitet worden.

7.3.1 Ziele

Das Ziel der Entwicklung war eine Methode und ein Werkzeug für die Bewertung von Antikollisionssystemen im Längsverkehr. Die Anforderungsliste sah vor, die Bewegungsgrößen eines vorausfahrenden Fahrzeugs aus der stationären Kolonnenfahrt mit einem unerwarteten Bremsmanöver darstellen zu können. Das Risiko für die Probanden durfte bei dem zu entwickelnden Testverfahren nicht höher ausfallen als bei anderen üblichen Fahrversuchsverfahren. Weiteres Ziel bei der Entwicklung von EVITA war es, die minimale Beeinflussung der Probanden durch das Werkzeug zu erreichen, weshalb Wert auf eine größtmögliche Übereinstimmung der Heckansicht mit einem herkömmlichen Personenkraftwagen gelegt wurde. Die Forderung nach der größtmöglichen Übereinstimmung der Heckansicht mit einem bekannten Fahrzeug öffnet neben der Durchführung von Probandenversuchen auch die Nutzung für die Entwicklung und Bewertung von Sensorkonzepten für Antikollisionssysteme.

7.3.2 Konzept

Das realisierte Konzept besteht aus der Kombination eines Zugfahrzeugs, einem Anhänger und einem auffahrenden Fahrzeug. Während einer stationären Folgefahrt bremst der Anhänger (Dummy Target genannt) für den im Versuchsfahrzeug sitzenden

Probanden überraschend ab. Unabhängig davon, ob der Proband auf das Manöver rechtzeitig reagiert oder nicht, wird der Anhänger aktiv aus dem Kollisionsbereich gezogen. **Bild 7-1** zeigt das Gespann.

7.3.3 Aufbau

Im Heck des Zugfahrzeugs befindet sich eine Seilwinde mit einer reibkraftschlüssigen Windenbremse und einem Elektromotor. Der Anhänger ist mit dem Zugfahrzeug nur über das Seil der Winde verbunden. Das andere Ende des Seils ist an der Achsschenkellenkung der Vorderachse des Anhängers befestigt. Die Scheibenbremsen des Anhängers werden hydraulisch via Handbremshebel von einem Elektromotor betätigt. Im hinteren Bereich des Anhängers befindet sich das originale Heck der Mercedes A-Klasse. An diesem Heck ist ein Radarsensor befestigt. Im Zugfahrzeug und im Anhänger befinden sich Rechner, die durch Funkmodems miteinander verbunden sind. Als Grundgerüst für das Dummy Target dient eine Gitterrohrrahmenkonstruktion mit vier Einzelradaufhängungen eines Quads. Der große Nachlauf der Vorderachse sorgt für einen ruhigen Geradeauslauf. In einem feuchtigkeitsgeschützten Gehäuse befindet sich der lüfterlose Rechner zusammen mit dem Funkmodem, der Energieversorgung und der Bremsensteuerung. Die Bremsleuchten der Heckansicht sind funktionstüchtig. Die Gesamtmasse des Dummy Target beträgt 200 kg. **Bild 7-2** zeigt eine Übersicht über die Komponenten des Dummy Target.

7.3.4 Versuchsablauf

Im Ausgangszustand ist der Anhänger hinter dem Zugfahrzeug kurzgekoppelt. Wird vom am Anhängerheck montierten, rückwärtig messenden Radar ein Fahrzeug (target object) in passendem Versuchsabstand detektiert, kann das Gesamtsystem für eine Versuchsdurchführung aktiviert werden. Ein Befehl des Bedieners im Zugfahrzeug öffnet die Bremse der Seilwinde und betätigt die Bremsen des Anhängers. Das Zugfahrzeug fährt während dieses Vorgangs mit konstanter Geschwindigkeit weiter. Durch das Bremsen des Dummy Target wickelt

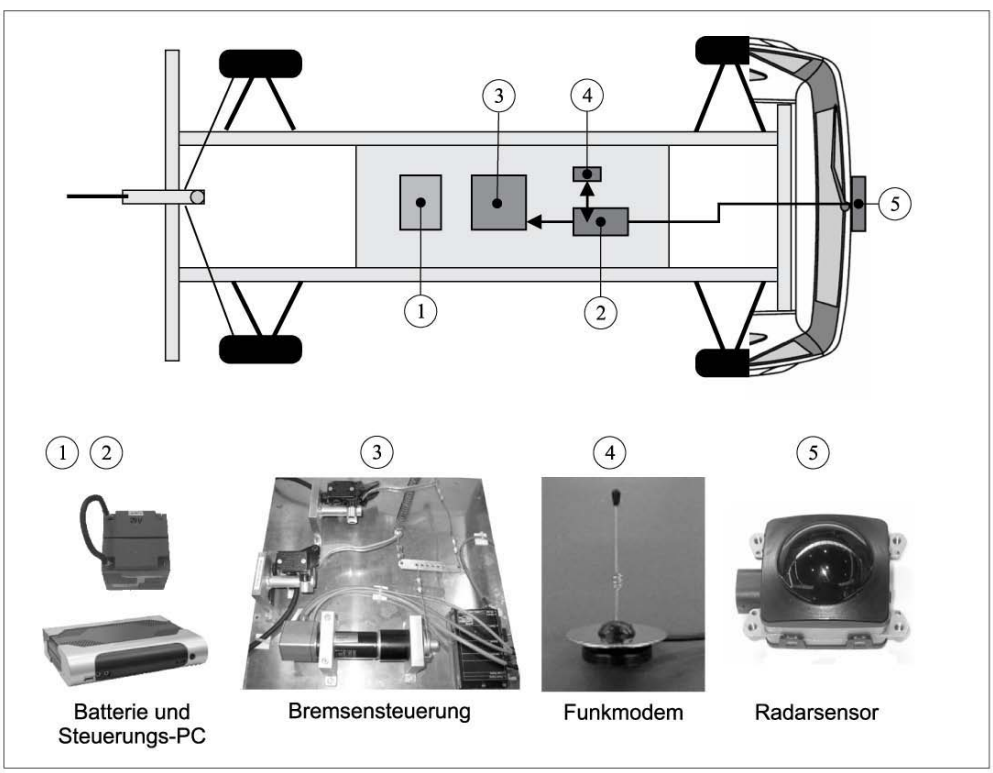


Bild 7-2: Komponenten des Dummy Target

sich das Seil der Winde ab. Während der Anhänger verzögert, berechnet die Verarbeitungseinheit des Abstandssensors permanent die Time-To-Collision (TTC). Die TTC ist ein aus Abstand und Relativgeschwindigkeit gebildetes Kriterium:

$$TTC = \frac{d}{v_{\mathrm{rel}}} \quad [TTC] = \mathrm{s} \tag{7.1}$$

Dabei gibt d den Abstand in [m] zum vorausfahrenden Objekt und Δv die Relativgeschwindigkeit in [m/s] an. Unterschreitet die TTC einen festgelegten Wert, schließt die Seilwindenbremse im Zugfahrzeug, und der Anhänger beschleunigt auf das mit konstanter Ausgangsgeschwindigkeit fahrende Zugfahrzeug. Die Beschleunigung des Anhängers dauert bei maximaler Differenzgeschwindigkeit ca. 1 s. Nach Beendigung des Versuchs bremst das gesamte Gespann bis zum Stillstand ab.

7.3.5 Leistungsdaten

Die Leistungsdaten von EVITA zeigt **Tabelle 7-1**.

Tabelle 7-1: Leistungsdaten EVITA

Maximale Differenzgeschwindigkeit zwischen auffahrendem Fahrzeug und EVITA	50 km/h
Maximale Bremsverzögerung von EVITA	9 m/s^2
Kleinste TTC vor einem Versuchende	0,8 s
Übliche Testgeschwindigkeiten (Ausgangsgeschwindigkeit)	50–80 km/h

7.4 Messkonzept im Versuchsfahrzeug

Mit der ausgewählten Methodik erfolgt die Messung zur Güte von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen unabhängig vom Werkzeug EVITA. Das Messkonzept zur Bestimmung der definierten Bewertungskriterien ist vollständig im Versuchsfahrzeug umgesetzt, welches mit einem Antikollisionssystem ausgestattet ist. Eine Umfeldsensorik klassifiziert die vorausfahrende EVITA als relevantes Zielobjekt. Objektgrößen wie beispielsweise Abstand, Relativgeschwindigkeit und Relativbeschleunigung werden zur Bestimmung der TTC. Über eine Bedienschnittstelle werden von einem Versuchsbegleiter Einstellungen zur Steuerung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen vorgenommen.

Das Fahrzeug verfügt über ein Messtechniksystem zur kombinierten Erfassung von CAN- und Kameradaten. Drei Kameras beobachten den Fahrer. Die erste Kamera ist auf das Vorfeld des Fahrzeugs gerichtet. Sie ermöglicht im Zusammenhang mit den Radar-Daten eine zuverlässige Interpretation der Situation. Die zweite Kamera ist vom Kombiinstrument aus auf das Gesicht des Fahrers gerichtet. Dadurch ist u. a. eine Zuordnung der Blickrichtung des Fahrers möglich. Die dritte Kamera ist auf die Pedalerie des Fahrzeugs fokussiert. Dies ermöglicht die Analyse der Fußbewegungen des Fahrers und die Bestimmung von Aktionszeiten, wie beispielsweise die Umsetzzeit vom Gaspedal auf das Bremspedal. Die Wiederholungsrate für jedes der drei Einzelbilder liegt bei 20 m/s. Dasselbe Messsystem zeichnet die CAN-Daten auf, sodass eine zeitliche Zuordnung von Bildern und Signalen gegeben ist. Als CAN-Daten stehen die üblichen Fahrzeugdaten wie Geschwindigkeit, Quer- und Längsbeschleunigung, Daten des vorausfahrenden Objekts sowie Daten aus der Benutzung des Fahrzeugführers wie Lenkradwinkel, Bremspedalbetätigung und weitere zur Verfügung.

7.5 Gefährdungen von Versuchsteilnehmern

Zur Bestimmung potentieller Systemfehlfunktionen wurde eine System-FMEA durchgeführt und daraus Maßnahmen für den sicheren Betrieb abgeleitet. Während jeder Versuchsdurchführung laufen automatisierte Sicherheitsprüfroutinen ab. Wird ein Fehler erkannt, wird das System in einen sicheren und stabilen Zustand überführt. Das Sicherheitsniveau wird durch das automatisierte Auslösen einer Notbremsung im folgenden Versuchsfahrzeug beim Erreichen einer TTC von 0,7 s zusätzlich erhöht. Die für die Durchführung der Versuche eingestellte, minimal erreichbare TTC durch eine kollisionsvermeidende Aktion von EVITA liegt bei 0,8 s (siehe **Tabelle 7-1**). Wird eine TTC kleiner als 0,8 s erreicht, so muss von einer Fehlfunktion von EVITA ausgegangen werden. Sollte eine Kollision trotz aller Vorkehrungen unvermeidbar sein, wird aufgrund der geringen Masse des Dummy Target kein Schaden für Versuchspersonen erwartet.

7.6 Bewertungsmethode

Mit EVITA liegt das Werkzeug zum Erzeugen von kritischen Unfallsituationen vor. Im Folgenden wird eine der Hauptbewertungsgrößen zur Beurteilung der Güte von Antikollisionssystemen beschrieben.

7.6.1 Wirksamkeit eines Antikollisionssystems

Als objektive Beurteilungsgröße für die Wirksamkeit eines Antikollisionssystems (speziell von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen) wird die Verringerung der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs vor dem Aufprall herangezogen. Dieses Kriterium stimmt mit dem generellen Ziel von Antikollisionssystemen überein, entweder die Aufprallgeschwindigkeit zu reduzieren, oder die vollständige Vermeidung des Aufpralls zu erreichen. Je höher die Verringerung der Geschwindigkeit, desto wirksamer ist das Antikollisionssystem. Neben der objektiven Wirksamkeit wird die von den Probanden beurteilte subjektive Wirksamkeit definiert. Diese per Fragebogen ermittelte Größe wird als Vergleich zwischen verschiedenen Ausprägungen von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen durch das Bilden einer Rangfolge definiert.

7.6.2 Probandenversuch

Eine Erkenntnis aus in-depth studies ist, dass viele Fahrzeugführer vor einem Auffahrunfall abgelenkt sind [10]. Daher werden die Probanden des auffahrenden Versuchsfahrzeugs kurz vor einer Abbremsung von EVITA mit einer Nebenaufgabe zu einer länger als 2 s dauernden Blickabwendung verleitet. Durch den im Versuchsfahrzeug sitzenden Bediener wird während der Blickabwendung des Probanden die Auslösung der kritischen Auffahrsituation ausgelöst. Der Proband wird anschließend beim Erreichen einer vordefinierten TTC-Schwelle beispielsweise von den Warnelementen des Antikollisionssystems alarmiert. **Bild 7-3** zeigt idealisiert den Geschwindigkeitsverlauf des Versuchsfahrzeugs über der Zeit. Erkennbar sind die Ablenkung des Probanden und die Bremsung des Dummy Target. Beim Erreichen der kritischen Schwelle wird beispielsweise eine Alarmierung des Fahrers oder ein sonstiger Eingriff ausgegeben. Typischerweise folgen dann eine Blickzuwendung durch den Probanden auf die Situation vor dem Ego-Fahrzeug und der Bremsbeginn.

7.6.3 Beurteilungszeitraum

Für die Standardisierung der Methode wird dem Probanden über eine zusätzliche Anzeige im Kom-

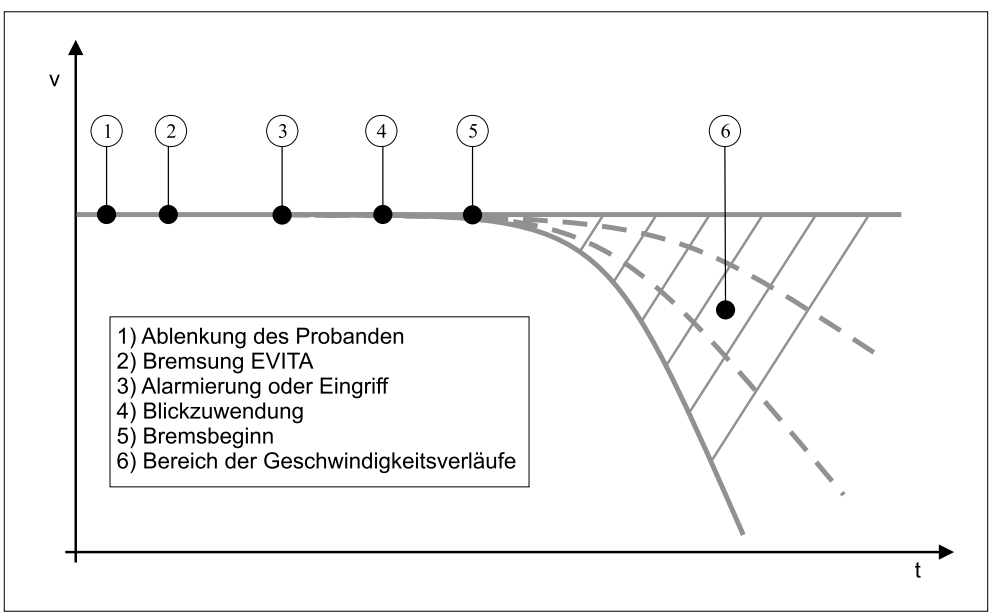


Bild 7-3: Idealisierter Versuchsablauf als Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit des Versuchsfahrzeugs

biinstrument ein zulässiger Abstand zur vorausfahrenden EVITA vorgegeben. Ist der Abstand zu groß oder zu gering, wird dem Fahrer eine rote Ampel angezeigt. Liegt der Abstand im Bereich von 20 bis 25 m, so leuchtet die Ampel grün. Nur in diesem Fall wird ein Versuch durch die Abbremsung von EVITA ausgelöst.

Für die Beurteilung der Wirksamkeit wird ein Beurteilungszeitraum festgesetzt. Der Zeitraum beginnt mit dem Zeitpunkt des Auslösens einer Warnung oder eines Fahrzeugeingriffs. Er endet zum Zeitpunkt eines gedachten, ungebremsten Aufpralls des Versuchsfahrzeugs auf das vorausfahrende, ununterbrochen bremsende Dummy Target. Dieser Aufprall ist „gedacht", da von EVITA automatisch eine Kollision vermieden wird. Der Endzeitpunkt wird in Abhängigkeit des TTC-Algorithmus und der Auslöseschwelle in einem ungebremsten Eichversuch ohne Proband bestimmt. Für eine typische Warnung mit dem TTC-Algorithmus beträgt der Betrachtungszeitraum 2 s. Die Warnschwelle wurde unter Kenntnis von Warnzeitpunkten bekannter Frontalkollisionsgegenmaßnahmen definiert. So können Warnelemente sowohl miteinander als auch mit autonomen Bremseingriffen verglichen werden.

Zur Bestimmung der Wirksamkeit wird die Geschwindigkeit des Probandenfahrzeugs zu Beginn und am Ende des Beurteilungszeitraums gemessen und die Geschwindigkeitsdifferenz Δv gebildet. **Bild 7-4** zeigt den Beurteilungszeitraum.

7.6.4 Vergleiche von Antikollisionssystemen

Das einheitliche Bewertungsverfahren ist Grundlage für den Vergleich verschiedener Ausprägungen von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen. Für die Bewertung werden mit einem entsprechend geteilten Kollektiv von Probanden Testfahrten unter Berücksichtigung verschiedener Ausprägungen durchgeführt. Der Vergleich der über alle Probanden gemittelten Geschwindigkeitsreduktionen im Beurteilungszeitraum gibt die Wirksamkeit der Varianten wieder.

Eine Beurteilung der absoluten Wirksamkeit eines Antikollisionssystems ist durch die Verwendung einer so genannten Baseline zu erreichen. Dabei wird ein Teil des Probandenkollektivs ohne einen Eingriff des Antikollisionssystems mit der kritischen Situation konfrontiert und beispielsweise die Geschwindigkeitsdifferenz bestimmt.

Für die Bewertung der Wirksamkeit des Antikollisionssystems ist nur der erste Versuch des Probanden eine unbeeinflusste Basis. Bei allen weiteren Versuchen hat der Proband trotz einer

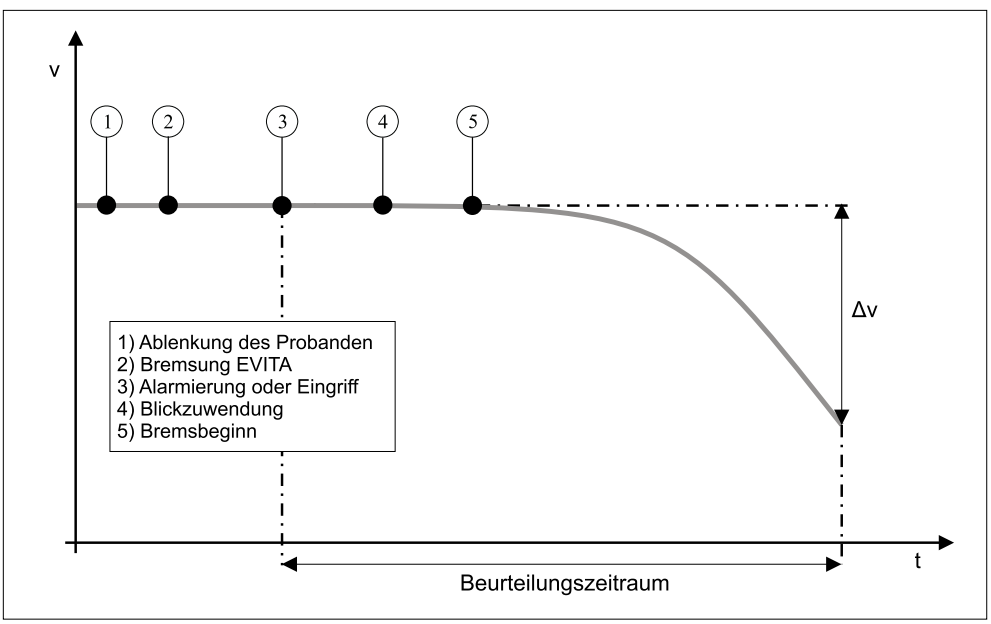


Bild 7-4: Idealisierter Versuchsablauf als Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit des Versuchsfahrzeugs mit Beurteilungszeitraum und Geschwindigkeitsdifferenz

lückenhaften Vorinformation über den eigentlichen Zweck der Versuche den Versuchsgegenstand einer überraschenden Notsituation verstanden, er gilt als voreingenommen. Der Bewertung der Akzeptanz durch den Fahrer kommt bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen mittlerweile eine große Beachtung zu [11]. Die weiteren Versuche nach der ersten Notsituation eignen sich zum Erzeugen weiterer Erkenntnisse, wie etwa dem Umgang mit Fehlwarnungen oder den vergleichenden Probandeneinschätzungen zu Varianten von Antikollisionssystemen. Die Einschätzung von Probanden zur erlebten Situation und zur Bewertung von Fahrerwarnelementen wird mit Fragebögen erhoben. Der Auswertung dieser Fragebögen werden Hinweise zur Gestaltung von Fahrerwarnelementen entnommen.

7.7 Ergebnisse

Es wurden umfangreiche Versuche mit einer Anzahl von rund 250 Probanden durchgeführt. Für die Übertragung der Erkenntnisse auf die Realität kommt der Evaluierung des Versuchsaufbaus eine große Bedeutung zu. Die Auswertung der Versuche zeigt, dass sich bei gewöhnlicher Folgefahrt keine Auffälligkeiten im Fahrverhalten der Probanden erkennen lassen, die auf den Versuchsaufbau zurück zu führen sind. Bestätigt wird diese Erkenntnis durch die per Fragebögen erhobene Einschätzung der Probanden. Somit ist das Ziel, keine negative Beeinflussung der Probanden durch den Versuchsaufbau zu erhalten, erreicht. Ein Teil der Ergebnisse zu den untersuchten Fahrerwarnelementen finden sich in Kapitel 24. Es zeigt sich im Versuch, dass eine Warnung mit einem Reifenquietschen aus dem Kombiinstrument und ein Bremsruck signifikant besser sind als keine Warnung (Baseline). Eine autonome Teilverzögerung ist hochsignifikant wirksamer, als die Baseline. Ergebnisse aus der Anwendung der Methode finden sich in [12], [13], [14], [15], [16], [17].

Quellenverzeichnis

[1] *Kassaagi, M.; Bouslimi, W.; Val, C.; Bersac, J.-M.; Moessinger, M.; Page, Y.*: Laboratory of Accidentology, Biomechanics and studies of human behavior, PSA: Effectiveness of Emergency Brake Assist in Rear-End Accident Scenarios, FISITA 2006 (F2006D062), S. 3, 5

[2] Hightechreport, DaimlerChrysler, 1/2005, S. 56f.

[3] ATZ System Partners 2003, Continental Teves, S. 30

[4] *Bock, Th.; Maurer, M.; van Meel, F.; Müller, T.*: Vehicle in the Loop. Ein innovativer Ansatz zur Kopplung virtueller mit realer Erprobung, ATZ 01/2008, S. 10ff.

[5] *Jansson, J.*: Collision avoidance theory with applications to automotive collision mitigation, Dissertation Nr. 950, Linköping University, Sweden, 2005

[6] *Schmitt, J.; Breu, A.; Maurer, M.; Färber, B.*: Simulation des Bremsverhaltens in Gefahrensituationen mittels experimentell validiertem Fahrermodell, VDI-Berichte Nr. 2015, 2007, S. 78

[7] *Shutko, J.*: An Investigation of Collision Avoidance Warnings on Brake Response Times of Commercial Motor Vehicle Drivers, Master's thesis, Virginia-Tech, Blacksburg, 1999

[8] *Bender, E.; Darms. M.; Schorn, M.; Stählin, U.; Isermann, R.; Winner, H.*: Antikollisionssystem PRORETA – Auf dem Weg zum unfallvermeidenden Fahrzeug, ATZ 04/2007

[9] *Winner, H.; Hoffmann, J.; Regh, F.*: Aktive Sicherheit – Funktionstestverfahren für FKGM, Safety Update, Aschaffenburg, April 2008

[10] NHTSA Report 2001

[11] *Bubb, H.*: Fahrversuche mit Probanden – Nutzwert und Risiko, Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, Darmstadt, 2003

[12] *Hoffmann, J.; Winner, H.*: EVITA – Die Prüfmethode für Antikollisionssysteme, 5. Workshop Fahrerassistenzsysteme, Walting, April 2008

[13] *Hoffmann, J.; Winner, H.*: EVITA – Das Untersuchungswerkzeug für Gefahrensituationen, 3. Tagung aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, Garching, April 2008

[14] *Winner, H.; Fecher, N.; Hoffmann, J.; Regh, F.*: Bewertung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen – Status Quo, Integrated Safety, Hanau, Juli 2008.

[15] *Fecher, N.; Fuchs, K.; Hoffmann, J.; Abendroth, B.; Bruder, R.; Winner, H.*: Fahrerverhalten bei aktiver Gefahrenbremsung, Automobiltechnische Zeitschrift, 11/2008

[16] *Hoffmann, J.; Winner, H.*: EVITA – The testing method for collision warning and collision avoidance systems, FISITA 2008, F2008-12-019

[17] *Fecher, N.; Fuchs, K.; Hoffmann, J.; Bruder, R.; Winner, H.*: Analysis of the driver behavior in autonomous emergency hazard braking situations, FISITA 2008, F2008-02-030

8 Bewertung von Fahrerassistenzsystemen mittels der Vehicle in the Loop-Simulation

Thomas Bock

Mit der Vehicle in the Loop-Simulation hat Audi eine Test- und Simulationsumgebung für Fahrerassistenzsysteme entwickelt, welche die Vorzüge eines realen Versuchsfahrzeugs mit der Sicherheit und Reproduzierbarkeit von Fahrsimulatoren kombiniert. Virtueller Fremdverkehr, Straßenbegrenzungen oder sonstige simulierte Gegenstände werden durch ein „Optical see through Head Mounted Display" während der Fahrt realitätsnah und kontaktanalog für den Fahrer eingeblendet. Besonders bei der Erprobung aktiver Fahrerassistenzsysteme eröffnen sich durch das Konzept des virtuellen Fremdverkehrs im realen Versuchsfahrzeug neue Möglichkeiten.

8.1 Motivation

Die starke Zunahme der Fahrzeugkomplexität, getrieben durch den zunehmenden Einzug der Regelsysteme und deren Vernetzung ins Fahrzeug, die gestiegene Variantenvielfalt und den höheren Individualisierungsgrad, wäre ohne Simulationsunterstützung nicht mehr in der gewünschten Qualität umsetzbar. Die Verfügbarkeit und Qualität von Simulationsmethoden und deren Prozessintegration wird damit zu einer „conditio sine qua non" und außerdem zu einem entscheidenden Wettbewerbsfaktor [1].

Es bleibt jedoch festzuhalten, dass die virtuelle Entwicklung die Hardware nicht komplett ersetzen kann, sondern komplementär und unterstützend zu dieser eingesetzt wird. Die sinnvolle Ergänzung von virtuellen sowie physischen Modellen und Methoden, integriert im Produktprozess, ist demnach die Herausforderung an die Eigenschaftsentwicklung im heutigen Gesamtfahrzeug. „Das Beste aus zwei Welten" ist damit ein wesentlicher Erfolgsfaktor für einen effizienten, transparenten und qualitativ guten Produktprozess (vgl. **Bild 8-2**) [2].

Bild 8-3 zeigt einen Auszug der eigenschaftsprägenden Regelfunktionen im Fahrwerk, die bereits in die heutigen Produkte Einzug gehalten haben. Viele davon sind adaptiv, d. h. Kennlinien und Einstellungen verändern sich mit den Fahrzuständen. Die daraus entstehende Vielfalt an Einstellungsmöglichkeiten und deren Rückwirkungen auf das Fahr- und Funktionsverhalten ist ohne Simulationsunterstützung nicht mehr erprobbar.

8.2 Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen

Systeme zur Verbesserung der Fahrsicherheit stellen ein wichtiges Entscheidungskriterium beim Neuwagenkauf dar und werden zu einem immer wichtigeren Umsatz- und Ertragsträger für den Automo-

Bild 8-1: Augmented Reality (AR)-Darstellung im Vehicle in the Loop

Bild 8-2: Verknüpfung von virtueller und physischer Erprobung als Erfolgsfaktor [2]

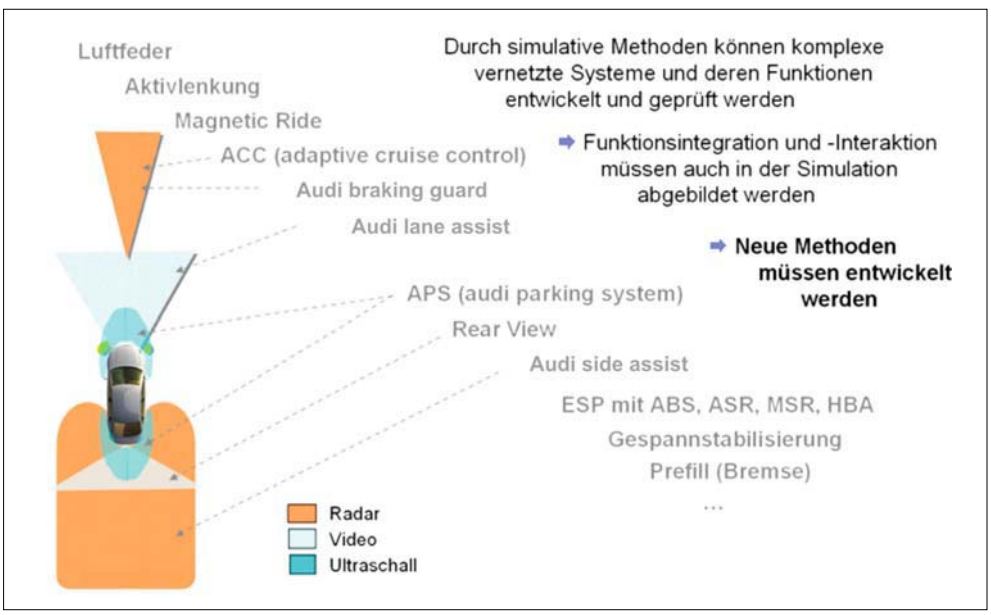


Bild 8-3: Geregelte Fahrwerks- und Fahrerassistenzsysteme

bilsektor [3]. Während im klassischen Bereich der passiven Fahrsicherheit nur noch kleine Fortschritte mit verhältnismäßig hohem Aufwand erzielt werden können, lassen sich mit Systemen zur aktiven Sicherheit deutlich mehr Potenziale ausschöpfen.

Ein aktuelles Forschungs- und Entwicklungsthema stellen autonom intervenierende Assistenzsysteme dar, welche Unfälle vermeiden (Collision Avoidance) oder Unfallfolgen mindern (Collision Mitigation) sollen. Da derartige Systeme teilweise auch ohne explizite Handlung des Fahrers in die Fahrdynamik eines Fahrzeugs eingreifen, sind die Anforderungen an die Funktionssicherheit und Zuverlässigkeit der Einzelsysteme sowie deren

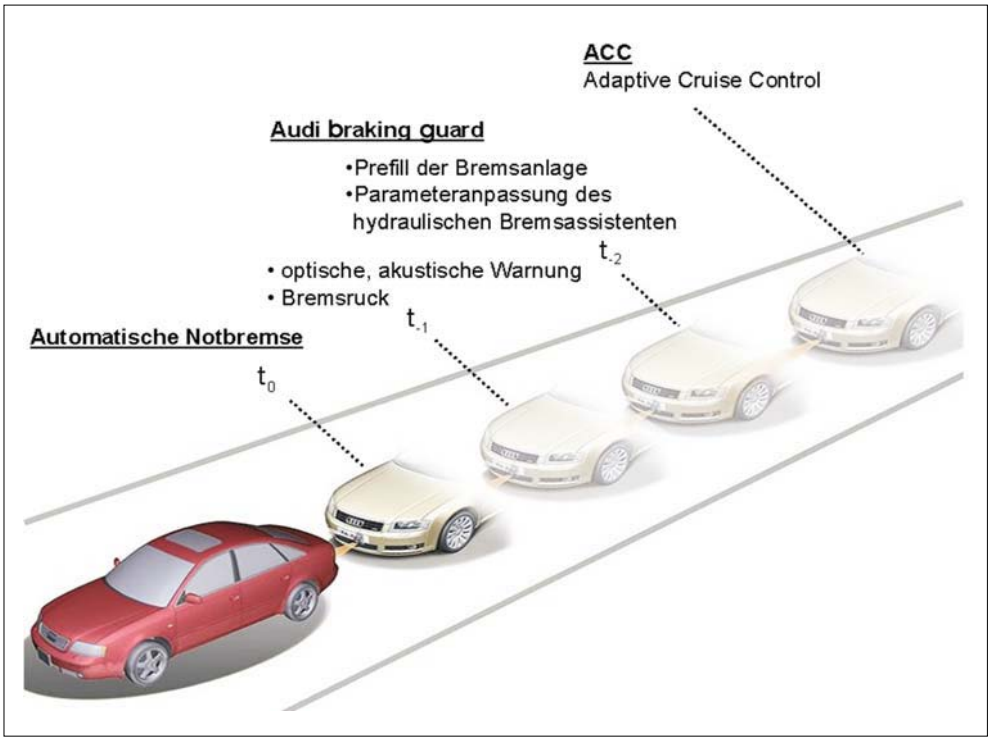


Bild 8-4: Entwicklungstrend ACC – Audi braking guard – Automatische Notbremse

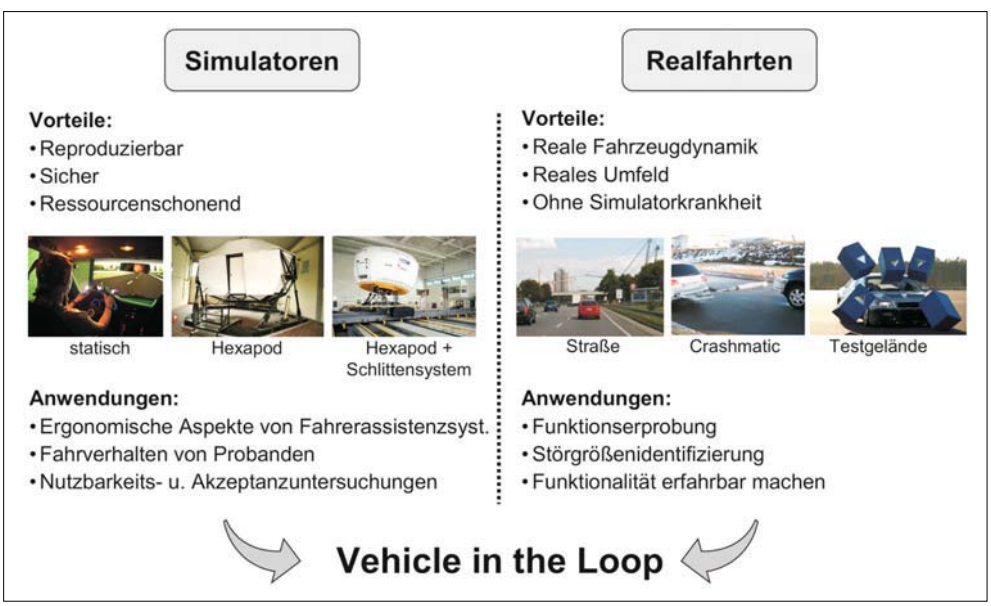


Bild 8-5: Vehicle in the Loop – Kopplung von Simulator und Realfahrzeug

Interaktion mit bereits bestehenden Fahrzeugsystemen besonders hoch.

Mit der gestiegenen Komplexität dieser Systeme ändern sich auch die Anforderungen an die bis zur Entwicklung der Serienreife benötigten Test- und Simulationswerkzeuge. Aktuelle und künftige Assistenzsysteme können mit etablierten Methoden oft nur eingeschränkt oder überhaupt nicht erprobt werden. Der derzeit vertretbare Auslösezeitpunkt einer automatischen Notbremsung liegt beispielsweise in einem sehr kurzen Zeitfenster unmittelbar vor einer Kollision [4]. Deshalb erweist sich der reproduzierbare und vor allem sichere Test für den Versuchsfahrer derartiger Sicherheitssysteme bisher als sehr schwierig (vgl. **Bild 8-4**).

Fahrerassistenzsysteme, die in kritischen Verkehrssituationen unterstützen, erfordern eine Erprobung und Absicherung unter nahezu realen Verkehrsbedingungen. Zum aktuellen Stand der Technik gehören Fahrsimulatoren, Verkehrsflusssimulationen und Erprobungsfahrzeuge, die mit Ersatzobjekten wie z. B. Schaumstoffwürfeln kollidieren. Die derzeit verfügbaren Testwerkzeuge (einen Überblick gibt **Bild 8-5**) erfüllen die Forderungen nach einer realistischen, reproduzierbaren, sicheren und zugleich Ressourcen schonenden Testumgebung allerdings nur eingeschränkt.

8.3 Vehicle in the Loop

Anhand der bekannten Testmethoden zur Absicherung von Collision Mitigation- und Avoidance-Systemen wird die Notwendigkeit einer alternativen Testmöglichkeit offensichtlich. Diese muss analog zu Fahrsimulatoren eine sichere, reproduzierbare und Ressourcen schonende Testumgebung darstellen. Allerdings können selbst komplexe Bewegungssysteme die reale Fahrzeugdynamik nur begrenzt abbilden [5].

Der Ansatz des Vehicle in the Loop-Prüfaufbaus beruht daher auf der Kopplung des realen Testfahrzeugs mit einer virtuellen Verkehrsumgebung, um die Vorteile beider Verfahren zu vereinen. Der virtuelle Fremdverkehr wird dem Fahrer durch ein „Optical see through Head Mounted Display“ während der Fahrt realitätsnah und kontaktanalog auf einer realen Straße eingeblendet. Durch die Anwendung der Augmented Reality-Technologie bleibt die reale Umwelt (z.B. Fahrbahn, Straßenbebauung) für den Fahrer weiterhin voll sichtbar. Der Vehicle in the Loop-Prüfaufbau ermöglicht somit eine Funktionserprobung von Fahrerassistenzsystemen direkt in einem Fahrzeug, welches sich allerdings nicht im realen Verkehr bewegt, sondern auf Freiflächen oder abgesperrten Straßen wie z.B. auf einem Prüfgelände.

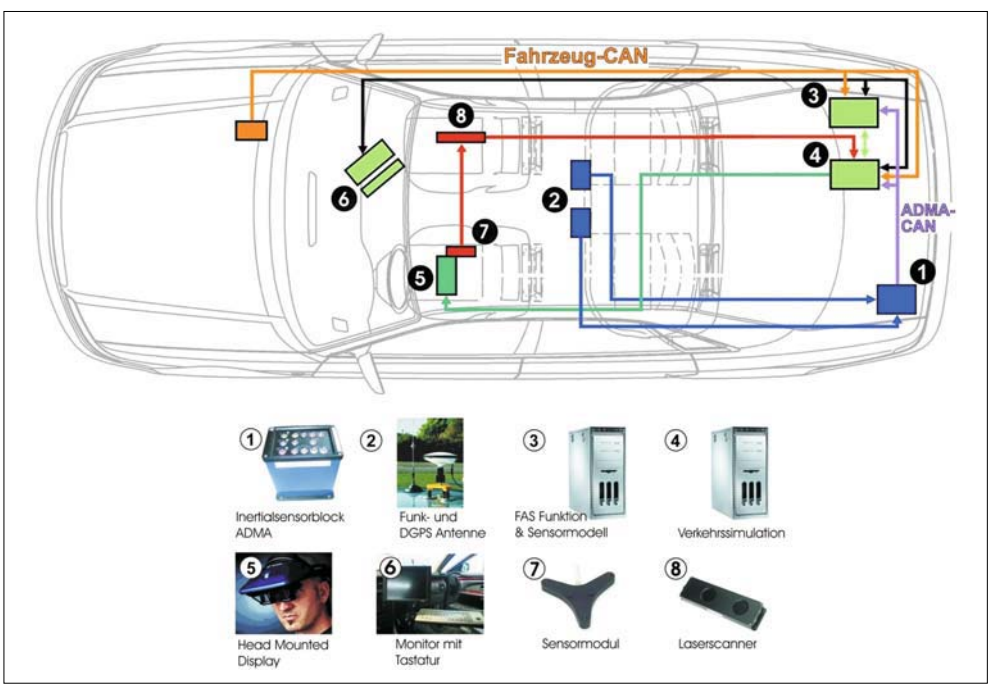


Bild 8-6: Systemarchitektur Vehicle in the Loop

Mithilfe von Sensormodellen ist es möglich, dass Fahrerassistenzfunktionen auf den virtuellen Fremdverkehr reagieren und somit die Funktion realistisch aber ungefährlich für Mensch und Maschine erprobt werden kann. Besondere Vorteile ergeben sich bei der Entwicklung von Assistenzsystemen wie etwa einer Notbremsfunktion, da auch fehlende Auslösungen des Systems aufgrund eines virtuell vorausfahrenden Fahrzeugs sicher und reproduzierbar untersucht werden können.

8.3.1 Verkehrssimulation und Visualisierung

In **Bild 8-6** wird der Systemaufbau des Vehicle in the Loop-Prüfaufbaus gezeigt [6].

Die Verkehrssimulation ist so konzipiert, dass mithilfe unterschiedlicher Trigger reproduzierbare Spurwechsel-, Brems- und Beschleunigungsmanöver des simulierten Fremdverkehrs hervorgerufen werden können. Die Auslösetrigger für diese Manöver können entweder relativ zu anderen Verkehrsteilnehmern (somit auch zum eigenen Versuchsfahrzeug) oder durch Überfahren einer absoluten Ortsposition ausgelöst werden. Der Fremdverkehr kann sich auch autonom fortbewegen, wobei hier die Längs- und Querdynamik eines Normalfahrers nachempfunden wird.

8.3.2 Positionierung des Versuchsträgers in der Verkehrssimulation

Zur Darstellung des richtigen Streckenausschnitts in der Verkehrssimulation muss die Position des Versuchsfahrzeugs auf der Prüfstrecke genau bestimmt werden. Dies erfolgt mithilfe einer Inertialsensorplattform mit DGPS-Anbindung. Falls die Anzahl der sichtbaren Satelliten oder das Funksignal zum Versuchsfahrzeug für die DGPS-Korrekturdaten abreißt, wird die Position des Versuchsfahrzeugs durch die Inertialsensorplattform weitergeführt. Alle Signale zur Fahrzeugposition und den Fahrzuständen werden auf einen eigenen CAN-Bus geschrieben und stehen somit der Simulation zur Verfügung.

8.3.3 Einbindung des Fahrers mithilfe von Augmented Reality

Der Fahrer kann nicht gleichzeitig das gesamte Fahrzeugumfeld, so wie es in der Simulation vor-

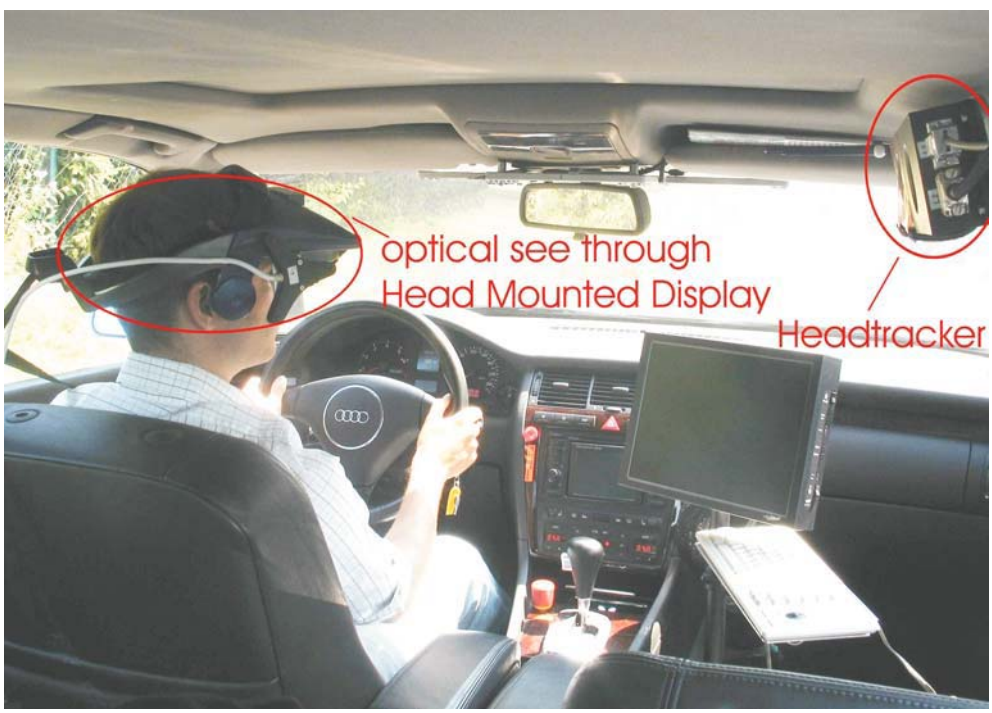


Bild 8-7: Head Mounted Display und Headtracker im Vehicle in the Loop

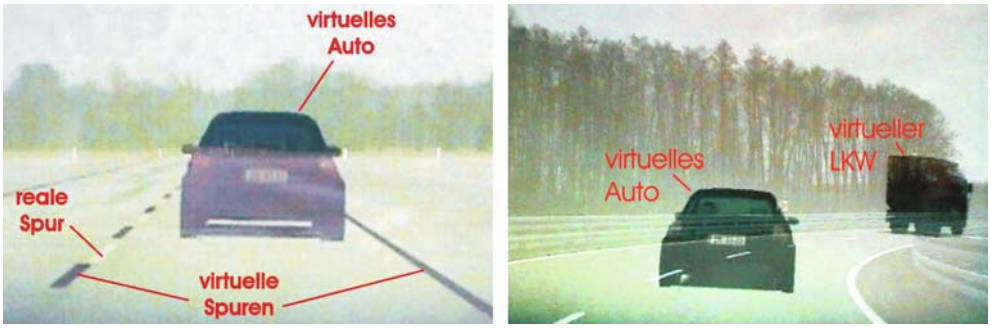


Bild 8-8: Augmented Reality-Darstellung des Vehicle in the Loop-Prüfaufbaus

handen ist, wahrnehmen; er ist auf sein persönliches Sichtfeld beschränkt. Dementsprechend muss sich die Visualisierung auf dieses natürliche Sichtfeld beschränken. Das Sichtfeld ändert sich laufend mit der Kopfposition des Fahrers. Nur der jeweils der Kopfposition des Fahrers entsprechende Ausschnitt aus der Verkehrssimulation darf im Head Mounted Display gezeigt werden.

Die Qualität des Vehicle in the Loop-Prüfaufbaus hängt entscheidend von der exakten Übereinstimmung dieses realen Sichtfelds mit dem eingeblendeten, simulierten Verkehr ab. Die hierfür notwendige Positions- und Richtungsbestimmung des Fahrerkopfes erfolgt durch einen Headtracker, welcher seitlich über der Beifahrertür montiert ist.

Die Simulation errechnet aus den eingehenden Daten für die Kopf- und Fahrzeugposition bzw. -lage (aus Headtracker und Inertialsensorblock) eine Visualisierung der Verkehrsszene aus der Fahrerperspektive. Damit der Fahrer des Versuchsfahrzeugs die visualisierte Verkehrsszene räumlich interpretieren kann, wurde die Bildebene/-abstand (Virtual Image Distance) des Head Mounted Displays auf 10 m festgelegt, da ab diesem Abstand überwiegend die monokularen Tiefenhinweise dominieren. Durch diese Tiefenhinweise können auch größere Distanzen zum Fremdverkehr glaubwürdig vermittelt werden.

In **Bild 8-8** ist eine Augmented Reality-Darstellung des Vehicle in the Loop zu sehen, in der das Versuchsfahrzeug des Vehicle in the Loop-Prüfaufbaus einem virtuellen Fahrzeug auf der Dynamikfläche (links) bzw. auf dem Handlingkurs (rechts) des Prüfgeländes folgt. Um dieses Bild zu erhalten, wurde eine Videokamera ins Head Mounted Display integriert, welche die Szene während der Fahrt mitfilmt. Neben dem virtuellen Fremdverkehr sind auf der Dynamikfläche zusätzlich virtuelle Fahrspuren eingeblendet, da auf der Dynamikfläche kein vorgegebener Fahrbahnverlauf vorhanden ist. Auf dem Handlingkurs wird auf die Darstellung der virtuellen Fahrspuren verzichtet, da sich der Fahrer an den realen Fahrspuren orientieren kann.

8.3.4 Sensormodelle

Der Vehicle in the Loop-Prüfaufbau wird für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen eingesetzt, welche auf Umfeldsensorik basieren. Naturgemäß können reale Umfeldsensoren keine Objekte eines virtuellen Verkehrsumfelds erfassen. Daher sind entsprechende Sensormodelle zur Abbildung der Sensorfunktion erforderlich. In einem ersten Schritt wurde hierzu ein Radar- und Videosensormodell entwickelt. Es wird dazu das Verhalten der realen Sensorik unter Nachbildung der physikalischen Zusammenhänge in einem Softwaremodell abgebildet. Die Kommunikation erfolgt nach einem definierten Protokoll, in welchem u. a. Positions- und Zustandsdaten des simulierten Fremdverkehrs vom Simulationsrechner übertragen werden. Da das Sensormodell auf Basis idealer Fremdverkehrpositionsdaten aus der Verkehrssimulation arbeitet, mussten zusätzlich die typischen Störgrößen und Messunsicherheiten realer Sensoren statistisch ausgewertet und entsprechend in das Sensormodell eingebunden werden. Insbesondere wurden der Erfassungsbereich, die x/y-Abweichung und das Trennfähigkeitsvermögen für unterschiedliche Verkehrsteilnehmer (PKW, LKW, Motorrad) erfasst und durch mathematische Fehlergleichungen modelliert.

8.4 Gesamtarchitektur des Vehicle in the Loop

Im **Bild 8-9** wird zusammenfassend die Gesamtarchitektur des Vehicle in the Loop-Prüfaufbaus vor-

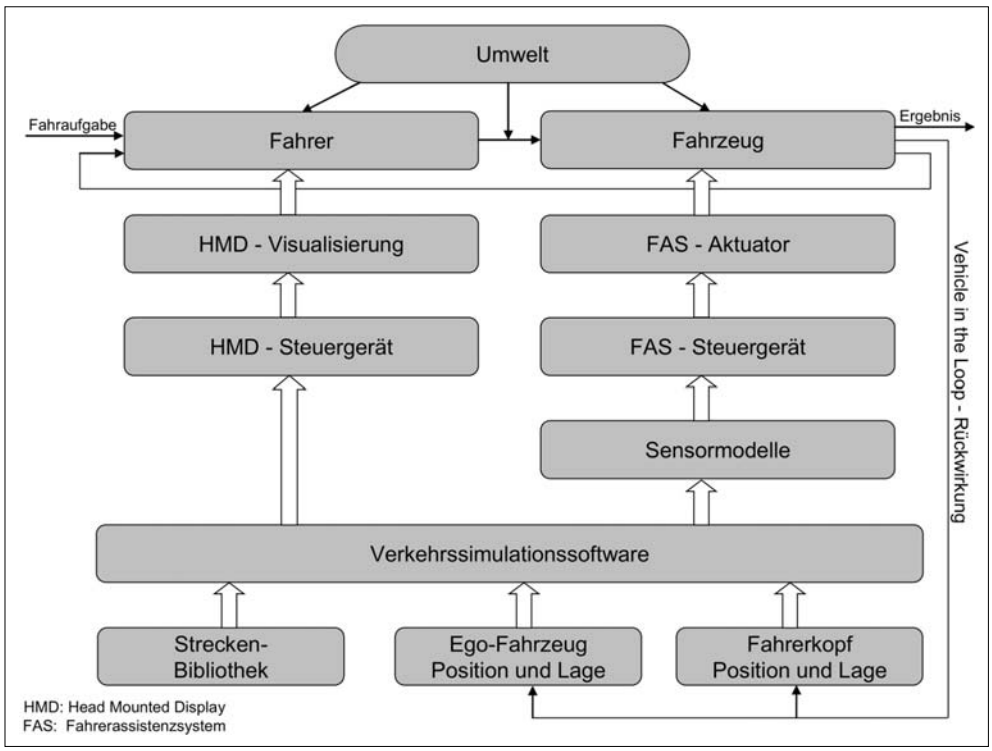


Bild 8-9: Funktionale Architektur des Vehicle in the Loop-Prüfaufbaus

gestellt. Die Positions- und Lagedaten des Versuchsfahrzeugs und des Fahrerkopfes werden während des Betriebs an eine Verkehrssimulationssoftware übergeben. Zusätzlich muss im Vorfeld der exakte Streckenverlauf der zu befahrenden Straße in einer Streckenbibliothek hinterlegt und ebenfalls an die Verkehrssimulationssoftware übergeben werden. Die Verkehrssimulation berechnet aus den Eingangsdaten die Position und Ausrichtung des Versuchsfahrzeugs auf der befahrenen Straße und die Positionsdaten des virtuellen Fremdverkehrs. Die Verkehrssituation wird mithilfe eines „optical see through Head Mounted Displays“ in Abhängigkeit der Kopfposition und -orientierung für den Fahrer visualisiert. Mithilfe von Sensormodellen, welche als Eingangsdaten die Positions- und Lagedaten des Fremdverkehrs und des eigenen Versuchsfahrzeugs von der Verkehrssimulation erhalten, werden Eingangsdaten für das Fahrerassistenzsystem geschaffen. Wird beispielsweise eine Automatische Notbremse auf ein simuliertes Fahrzeug ausgelöst, hat dies einen Eingriff in den Fahrer-Fahrzeug-Umwelt-Regelkreis zur Folge. Durch das Einlesen neuer Fahrzeug- und Fahrerkopfpositions- und Lagedaten wird der Vehicle in the Loop-Regelkreis geschlossen.

8.5 Validierung des Vehicle in the Loop

Mithilfe einer Studie mit 36 Probanden wurde überprüft, inwieweit der Vehicle in the Loop-Aufbau als Tool für Entwicklungsingenieure dienen kann. Eine entscheidende Rolle spielt dabei, neben technischen Messdaten, die subjektive Wahrnehmung des Fremdverkehrs durch den Fahrer. Hieraus leitet sich direkt die Anforderung an den Vehicle in the Loop ab, dass der Fahrer den Verkehr möglichst realistisch wahrnehmen muss. Somit stand im Fokus der Studie zu prüfen, ob das Fahrverhalten der Probanden bei den Versuchen mit virtuellem Vorderfahrzeug dem Verhalten bei einem realen Vorderfahrzeug gleicht.

Die Überprüfung dieser Anforderung erfolgte auf Basis zweier Datenquellen. Zum einen konnte ein Fragebogen Aufschluss über die subjektive

Wahrnehmung des simulierten Verkehrs und das Zusammenspiel der Simulation mit den kinematischen Fahreigenschaften geben. Zum anderen ließen sich bei definierten Fahrmanövern Erkenntnisse aus dem Vergleich der Fahrerreaktionen auf simulierten und realen Verkehr gewinnen. Hierzu wurden objektive Daten der beiden Fahrten (realer/simulierter Verkehr) aufgezeichnet und miteinander verglichen.

Die Studie hat gezeigt, dass der Vehicle in the Loop-Prüfaufbau als zukünftiges Entwicklungstool geeignet ist. Die Simulation des virtuellen Fremdverkehrs durch den Vehicle in the Loop und dementsprechend auch das Fahrgefühl bei den Versuchen ist sehr realitätsnah. Die Versuchspersonen zeigten bei den Fahrten mit virtuellem Vorderfahrzeug vergleichbares Fahrverhalten wie im realen Versuch. Sie konnten sich vorstellen, mit dem Vehicle in the Loop als Entwicklungswerkzeug zu arbeiten und waren von der Möglichkeit, kritische Fahrmanöver realitätsnah darstellen zu können, überzeugt.

Eine kurze Trainingsphase von ca. 15 Minuten war ausreichend, um mit dem System Vehicle in the Loop vertraut zu werden. Bei häufiger Benutzung dieses Systems gewöhnt sich der Benutzer schnell an die verbaute Messtechnik und an das Tragen des Head Mounted Displays. Das aus herkömmlichen Fahrsimulatoren bekannte Problem der Simulatorkrankheit, auch Motion Sickness genannt, wird durch das Vehicle in the Loop-System im Augmented Reality-Modus vermieden [7].

8.6 Ausblick

Der Einsatz virtueller Entwicklungstechniken stellt heute einen wesentlichen Erfolgsfaktor in der Produktentwicklung dar. Dadurch können frühzeitig Fahrzeugeigenschaften ermittelt werden, die noch vor Aufbau der ersten Prototypen zu einem höheren Reifegrad der Fahrzeuge führen.

Neben der Reduktion der Entwicklungszeit und -schleifen werden virtuelle Entwicklungsmethoden als Absicherungswerkzeuge für die immer weiter steigende Komplexität und Variantenvielfalt intensiv genutzt. Zukünftig wird es im Entwicklungsprozess der Automobilindustrie auch wichtig sein, bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen eine durchgängige und abgestimmte Toolkette aus Software in the Loop (SIL), Hardware in the Loop (HIL), Vehicle in the Loop (VIL) und dem Realtest zu definieren, deren Einzelkomponenten perfekt aufeinander abgestimmt, deren Einsatzspektren aber auch klar von einander abgegrenzt sind. Durch diese durchgängige Toolkette werden Schnittstellenanpassungen verringert, wodurch ein Potenzial für Entwicklungszeit- und Aufwandsreduktion entsteht.

Die virtuelle Entwicklung wird die konventionelle Entwicklung nie vollständig verdrängen. Andererseits stößt die konventionelle Entwicklung bereits an die Grenzen ihrer Machbarkeit. Es gilt deshalb, eine sinnvolle und unternehmerisch wirtschaftliche Ergänzung beider Methoden zu suchen.

Quellenverzeichnis

[1] *Bock, T.; Maurer, M.; van Meel, F.; Müller, T.*: Vehicle in the Loop – Ein innovativer Ansatz zur Kopplung virtueller mit realer Erprobung, Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Ausgabe 01/2008, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2008

[2] *Dick, M.*: Einsatz virtueller Techniken in der Audi Produktentwicklung, 11. Automobiltechnische Konferenz – Virtual Vehicle Creation, Stuttgart 2007

[3] *Oertel, K.*: Zukunftsmarkt Assistenzsysteme, Automotive Electronics+Systems, Carl Hanser Verlag, Vol. 11/12 – 2004

[4] *Kopischke, S.*: Entwicklung einer Notbremsfunktion mit Rapid Prototyping Methoden, Dissertation, Technische Universität Carolo Wilhelmina zu Braunschweig 2000

[5] *Bock, T.; Siedersberger, K.-H.; Zavrel, M.; Breu, A.; Maurer, M.*: Simulations- und Testumgebung für Fahrerassistenzsysteme – Vehicle in the Loop, Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung – Mess- und Versuchstechnik, VDI-Berichte 1900, 2005

[6] *Bock, T.; Maurer, M.; Färber G.*: Vehicle in the Loop (VIL) – A new simulator set-up for testing Advanced Driving Assistance Systems. Driving Simulation Conference, Iowa City, USA 2007

[7] *Bock, T.*: Vehicle in the Loop – Test- und Simulationsumgebung für Fahrerassistenzsysteme. AUDI Dissertationsreihe, Band 10, Cuvillier Verlag, Göttingen 2008

A

9 Einflüsse von Fahrerassistenzsystemen auf die Systemarchitektur im Kraftfahrzeug

Günter Reichart, Jürgen Bielefeld

9.1 Einleitung

Die Komplexität der Systeme bei modernen, hoch ausgestatteten Fahrzeugen hat ein hohes Niveau erreicht. Auch in Zukunft werden Innovationen im Kraftfahrzeug vermehrt nur über hochvernetzte und komplexe Systeme zu realisieren sein. Dies gilt in besonderem Maße für das Gebiet der Fahrerassistenz. Aufgrund der Nutzung von sensorisch erfasster Information über die Fahrumgebung, fahrzeuglokaler Daten und der Nutzung der bereits im Fahrzeug verbauten Aktorik sind Fahrerassistenzsysteme geradezu ein Synonym für verteilte hochvernetzte Funktionen. Umfang und Qualität der sensorisch erfassbaren Information und ihre Interpretation bestimmen den Funktionsumfang und die Komplexität der jeweiligen Assistenzfunktion wesentlich. Die technische Sensorik, z. B. Radar oder Kamerasysteme, nutzt gleiche oder ähnliche Information wie der Fahrer. Es wird allerdings auch auf längere Sicht keine Sensorik geben, die die Gesamtheit der Wahrnehmungsleistungen des Menschen und seine Fähigkeit der Interpretation dieser Daten in unterschiedlichen Kontexten erreicht. In einzelnen Aspekten sind technische Sensoren aber durchaus der menschlichen Wahrnehmung überlegen, wie beispielsweise bezüglich Daueraufmerksamkeit, Geschwindigkeitsbestimmung bewegter Objekte oder aufgrund von Empfindlichkeit in anderen Wellenlängenbereichen als der des menschlichen Auges. Insbesondere die Verknüpfung der Sensorinformationen, die so genannte Sensorfusion, bietet ein hohes Potenzial, den Fahrer zu entlasten und die Fahrsicherheit zu erhöhen bzw. kritischen Fahrsituationen vorzubeugen. Durch die Sensorfusion wird die Qualität der Interpretation von mit technischer Sensorik erfassten Daten deutlich erhöht. Hierzu sind Entscheidungen über die Fusionsebene wie Rohdaten, aufbereitete oder interpretierte Daten zu treffen sowie geeignete Fusionsarchitekturen im Fahrzeug vorzusehen (siehe Kapitel 17).

In einigen Situationen kann ein auf Sensordaten beruhender Eingriff technischer Systeme der Einschätzung und Reaktion des Fahrers überlegen sein. In diesen Fällen ist eine autonome Reaktion eines Fahrerassistenzsystems und damit eine Automatisierung der Fahrzeugführung oder -stabilisierung möglich. Generell muss aber sehr sorgfältig abgewogen werden, wann ein autonomer Eingriff eines technischen Systems erfolgen sollte und wie weit die Automatisierung von Fahraufgaben getrieben werden kann. Dementsprechend reicht das Spektrum von Fahrerassistenzsystemen von informierenden über warnende und aktiv unterstützende, aber übersteuerbare Systeme bis hin zu eingreifenden, nicht übersteuerbaren Systemen. Fahrerassistenzsysteme führen entweder Regelungsvorgänge zum Beschleunigen, Verzögern oder Lenken des Fahrzeugs aktiv aus, oder aber sie liefern Informationen und Warnhinweise, die der Fahrer selbst in die Anpassung der von ihm gewählten Führungsgrößen umsetzt. Mit zunehmender Vielfalt der Funktionen wird ein geeignetes Systemmanagement, das die konkurrierenden Eingriffe von Funktionen situationsgerecht priorisiert, immer dringlicher.

Der Schlüssel zur Beherrschung der dadurch weiter steigenden Systemkomplexität liegt in der Systemarchitektur des Fahrzeugs. Sie entscheidet letztlich darüber, inwieweit Maßnahmen der Komplexitätsbeherrschung wie Hierarchisierung, Modularisierung oder Standardisierung zum Tragen kommen können.

In modernen Fahrzeugen wie etwa im Siebener- oder Fünfer-BMW sind in der Vollausstattung über 60 elektronische Steuergeräte unterschiedlicher Zulieferer an der Bereitstellung der Gesamtfunktionalität beteiligt, siehe Abbildung 9-1.

Die Integration der Hard- und Softwarekomponenten zu einem verlässlichen Gesamtsystem stellt heute eine sehr hohe Herausforderung mit einem erheblichen Aufwand dar, der die lineare Fortsetzung des Hinzufügens von neuen Funktionen mit weiteren Steuergeräten in den bestehenden Systemarchitekturen, allein aus Gründen des Packages, kaum mehr zulässt. Eine Funktionsintegration auf wenige hochleistungsfähige Steuergeräte wird hier oft als Ausweg angesehen. Die Realisierung von neuen Funktionen durch Verteilung auf das bestehende Steuergerätenetzwerk ist zwar durchaus ein sinnvoller Weg, löst das Komplexitätsdilemma allein aber nicht. Die Komplexität der Datenvernetzung wird hierdurch zwar entlastet, jedoch führt die Integration zur weiteren, keineswegs leichter zu beherrschenden Steigerung der Komplexität auf der Komponentenseite. Die Probleme werden hier neben hoher Komplexität der Software insbesondere in die Beherrschung des Wärmehaushalts, Stromverbrauchs, der Aufbautechniken und des Packages verlagert. Die damit einhergehenden Fragen zur

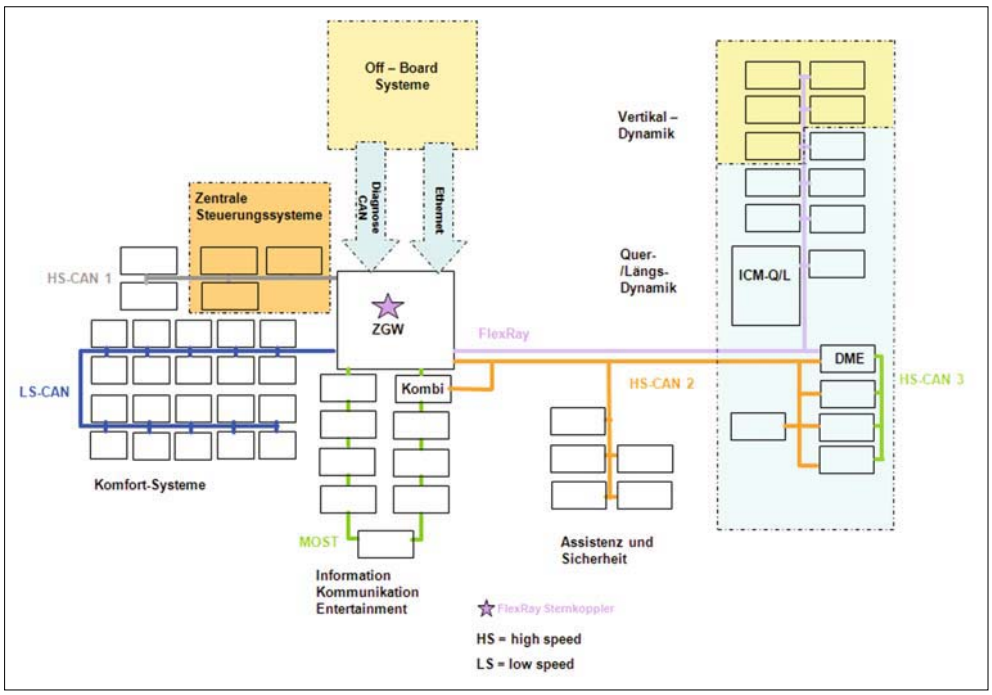


Bild 9-1: Systemarchitektur im derzeitigen BMW Siebener

Sicherstellung der Funktionsverfügbarkeit führen zu stark steigenden Anforderungen an die Zuverlässigkeit solcher hoch integrierten Steuergeräte und der angesteuerten Aktoren. Auch unterschiedliche Anforderungen an die Funktionssicherheit, die Vielzahl der Varianten zwischen Basis- und Vollausstattung und die schlechte Kostenmodularität setzen der Hochintegration dabei Grenzen. Hier müssen andere geeignete Ansätze zur Beherrschung des Komplexitätsanstiegs gefunden werden.

9.2 Systemarchitektur

Eine Systemarchitektur im Kraftfahrzeug beschreibt die Struktur eines Systems hinsichtlich

- der Abbildung der funktionalen Vernetzung der Einzelfunktionen in ihrer Abbildung auf Systemelemente,
- des Zusammenwirkens und der Vernetzung der Systemelemente,
- der Systemschnittstellen,
- der Umgebung,
- der Datenflüsse im System,
- der Daten-, Software- und Hardwarearchitektur.

Zu unterscheiden sind die funktionale, die logische und die technische Architektur, welche die Funktionen, ihre Eingangs- und Ausgangsgrößen sowie ihre Vernetzung beschreibt. Sie entsteht durch Abbildung dieser Funktionen auf technische Systemkomponenten, meist Steuergeräte. Den Prozess der Zuordnung von Funktionen zu technischen Komponenten und der Signale zu den Signalträgern wie Busse oder Einzelleitung wird Partitionierung genannt.

Die Hardware-Systemelemente einer Elektrik-/Elektronik-Systemarchitektur sind:

- Sensoren,
- Aktoren,
- elektronische Steuergeräte,
- der Kabelbaum als Verbund von Leitungen/Kabeln für Datentransport, für diskrete Signale und Energieversorgung,
- der Generator,
- Energiespeicher,
- Spannungswandler,
- Sicherungen und
- elektrische Antriebe.

Die Elemente der Hardware werden zusammenfassend auch Bordnetz genannt. Es sei in diesem

Zusammenhang aber darauf hingewiesen, dass die E/E-Systemarchitektur wesentlich mehr als das Bordnetz beinhaltet. Dieses Mehr ist nötig, da eine Integration der reinen HW-Komponenten ohne ein umfassendes Verständnis aller dazugehörigen Architekturelemente nicht möglich ist.

Der Entwurf einer Systemarchitektur muss unter vielfältigen Blickwinkeln erfolgen, die über die Erfüllung der reinen funktionalen Anforderungen deutlich hinausgehen. So müssen vielfältige Anforderungen hinsichtlich der Qualität und Sicherheit, Versionierung/Konfiguration, Logistik, Montage, Wartung/Service etc. erfüllt werden. Hier sind vielfältige Zielkonflikte neben Baukasten- oder Gleichteilstrategien, der Verfügbarkeit der Bauteile und Technologien über Produktlaufzeit und Gesichtspunkten der Kostenoptimierung aufgelöst und zum bestmöglichen Kompromiss zu führen.

Die wesentlichen Anforderungen an zukünftige Systemarchitekturen sind:

- Skalierbarkeit innerhalb und über Produktlinien,
- Erweiterbarkeit,
- Funktionssicherheit, Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit, Datensicherheit,
- Software-Update und -Upgrade über die Produktlebenszeit,
- Serviceanforderungen,
- Fahrzeugzustandsmanagement,
- Robustes und effektives Energiemanagement,
- Gute Testbarkeit und vereinfachte Integration,
- …

Wesentliche Entscheidungselemente einer Systemarchitektur sind die Entscheidungen bezüglich der Partitionierung der Funktionen auf die Steuergeräte, die Wahl der Gateways, die Vernetzung der Steuergeräte mit geeigneten Bustechnologien und deren Topologie. Die Kunst einer guten Architektur steckt in der Berücksichtigung der vielfältigen Wechselwirkungen getroffener Entscheidungen und in der Erreichung eines Gesamtoptimums.

Eine vorausschauende Auslegung der Architektur in Bezug auf die Abdeckung der Produktpalette und die Fähigkeit, die Funktionserweiterungen zur Erhaltung der Produktattraktivität, Erfüllung von neuen Gesetzesanforderungen etc. über die Produktlaufzeit auch ohne Konzeptbrüche aufzunehmen, ist eine sehr anspruchsvolle Aufgabe. Sie führt erhebliche Auswirkungen auf die elementaren Kenngrößen des unternehmerischen Handelns, wie Entwicklungsaufwand, Produktkosten, Produktqualität und Wirtschaftlichkeit mit sich.

9.3 Wichtige Einflüsse von Fahrerassistenzsystemen auf die Systemarchitektur

Durch eine geschickte, effiziente Nutzung und Verknüpfung der Informationen aus einigen wenigen Sensoren können vielfältige Funktionen der Fahrerassistenz dargestellt werden. So kann mit einer Kamera bei geeigneter Auslegung als Sensor eine Spurhalteunterstützung ebenso realisiert werden wie ein Fernlichtassistent oder eine Verkehrszeichenerkennung. Sensordatenfusion sollte nur dann zum Einsatz kommen, wenn damit eine aus Kundensicht hochwertige Funktion realisiert werden kann, wie etwa ein Abstandsregelsystem, das auch auf stehende Hindernisse reagiert, oder die Funktionssicherheit anders nicht ausreichend gewährleistet werden kann. In **Tabelle 9-1** sind verschiedene Sensortechnologien und die aus den verschiedenen Sensoren zu gewinnende Information nach Art und Qualität in einer Matrix eingetragen. Daraus kann für die Fusion der Daten abgeleitet werden, welche Informationen grundsätzlich sinnvoll miteinander fusioniert werden können. Darüber hinaus lässt sich erkennen, welche Technologien zur Gewinnung aussagekräftiger Informationen – mit allen Vor- und Nachteilen einer spezifischen Technologie – geeignet sind. Damit wird der Handlungsspielraum für den Architekten, der ein FAS-System in eine Architektur zu integrieren hat, stark eingeschränkt. Beispielsweise ist heute nur mit bildgebenden Verfahren eine Verkehrszeichenerkennung möglich, außer man stattet die Verkehrszeichen nachträglich mit Sendern oder Transpondern aus. Die Methoden der Mustererkennung aus Bilddaten – inklusive Bilddaten aus Videostreams – ermöglichen in aller Regel keine 100%ige Detektions- oder Klassifikationssicherheit. Somit ist es wünschenswert, eine zusätzliche, andere Sensortechnologie einzusetzen, um durch ergänzende Daten Fehlerkennungen der Verkehrszeichen substanziell zu minimieren oder gar auszuschließen. Allerdings zeigt Tabelle 1, dass hierbei die Auswahl stark eingeschränkt ist. Somit stellt sich schon in diesem Fall die Frage, ob eine Sensorfusion zielführend ist und eine Kostenmehrung rechtfertigt oder ein anderer technischer Weg eingeschlagen werden muss, um die Erkennung zu plausibilisieren. Die Plausibilisierung anhand von Daten aus der Kartenbasis der Navigation erweist sich in diesem Fall als der zielführende Weg.

Für den erzielbaren Kundennutzen der Fahrassistenzfunktionen ist allerdings auch die Gestaltung der Bedien- und Anzeigekonzepte von FAS-Funktionen von elementarer Bedeutung. Die Anzeigen

Tabelle 9-1: Aussagequalität verschiedener Sensorsysteme und Informationsquellen
+: hochwertig, ●: ausreichend, –: gering [nach [1])

Informationen \ Sensoren		Fzg.-Sensoren	Radar fern	Radar nah	Mehrstrahl-Laser	Laser-Scanner	Ultraschall	Video: Objekte	Video: Spur	Video: Verkehrsz.	Navi-Datenbasis	Sonst. Ext. Com.
Ego	Zustand	●										
	Bewegung	●										
Objekte	vorn fern		●		●		●		–			–
	vorn nah			+	+	+		–	●			
	hinten		●	●	●	●		–	●			
	seitlich			●	●	+			–			
	Geschwindigkeit	●	+	+	–	–			–			–
	Querposition		–	●	+	+			+			
	Größe				●	+			+			
	Ort								+		–	–
	Art								–			–
	Absicht											●
Straße	Verkehrszeichen										+	●
	Fahrspur									+	–	
	Markierungen									●	–	
	Typ									–	+	
	Parklücke								●			
	Kreuzung										+	●
Fahrer	Zustand	–										
	Absicht	–										

der verschiedenen Funktionen umfassen Bilddarstellungen auf Displays, statische oder dynamisierte Symbole in Kombi, Display oder Head-up-Display, haptisch taktile und auditive Informationen vielfach auch in Kombination, (siehe auch Kapitel 21 und 23). Hinzu kommt die Bedienung der Funktionen. Die Darstellung von Realbildern erfordert eine Übertragung zum Anzeigeort mit sehr hoher Übertragungsbandbreite. Videokompressionstechniken kommen wegen des damit verbundenen Zeitverzugs nur begrenzt infrage. Die im Bereich des Infotainments üblichen Bedien- und Anzeigekonzepte reichen angesichts der Anforderungen bei weitem nicht aus. Deshalb müssen für Fahrerassistenz spezifische Bedien- und Anzeigekonzepte in die jeweiligen Bordsysteme des Infotainments mit integriert werden.

9.4 Ausstattungsvarianz und Vernetzungskomplexität

Fahrerassistenzsysteme werden heute zumeist in fast freier Kombinierbarkeit als Sonderausstattungen angeboten. Dies erscheint zunächst logisch, da die Marktpenetration bei Innovationen zunächst gering ist. Sonderausstattungen unterliegen zudem

einer deutlich höheren Preisflexibilität beim Kunden als Serienausstattungen, somit können die zwangsläufig anfallenden Einführungskosten besser abgefangen werden.

Aus der Darstellung im vorangegangenen Abschnitt wird aber offensichtlich, dass FAS-Funktionen nur über eine dezidierte Vernetzung von Funktionalitäten aus unterschiedlichen Bereichen verwirklicht werden können. Damit ist aber auch eine Infrastruktur vorzuhalten, die sich im Basisfahrzeug in Aufwänden niederschlägt. Beispielsweise müssen Leitungen von Kameras im Außenbereich der Karosserie zu den bildverarbeitenden Steuergeräten vorgesehen werden. Diese Leitungen sind im Kabelbaum vorzuhalten, um die Leitungsdurchbrüche in der Karosserie – etwa Stirnwand – zu dimensionieren. Ferner sind beim Systemdesign die EMV-Auswirkungen dieser Leitungen zu ermitteln. Durch Störgrößen auf anderen Leitungen können nämlich die Videodaten der Kameras korrumpiert werden; ein gutes Systemdesign berücksichtigt dies von vornherein. Andernfalls drohen Maßnahmen, die dann nur noch die Wirkungen im Gesamtsystem minimieren können, aber nicht die Ursache beseitigen.

FAS-Systeme stellen ihrerseits Anforderungen an die Infrastruktur. Radar, Bild- und Videodaten benötigen eine entsprechende Bandbreite, leistungsfähige Algorithmen verbunden mit dem entsprechenden Datenvolumen erfordern Hochleistungsrecheneinheiten für die Echtzeitverarbeitung in der E/E-Architektur. Sofern die FAS-Funktionen in eine bestehende Infrastruktur teilweise oder ganz integriert werden, stellen diese zusätzlichen Anforderungen häufig eine erhebliche Hürde dar. Im schlimmsten Fall sind bestimmte Infrastrukturelemente wie Busse und Steuergeräte neu auszulegen, was zu Kostenmehrungen einzelner Komponenten führen kann.

Ein anderer Hinderungsgrund für die vollständige Integration von FAS-Funktionen in die E/E-Architektur kann die damit einhergehende Komplexitätserhöhung darstellen. Die Abbildung einer vollständigen Kommunikationsmatrix über mehrere Busse und Subbusse zur Realisierung einer FAS-Funktion resultiert häufig in unnötigen Abhängigkeiten zu anderen Systemen. Beispielsweise werden Bedienelemente für die FAS-Funktionen häufig über eine Bedieneinheit zusammengefasst, die über einen LIN-Bus an einem ansonsten an der Funktion völlig unbeteiligten Steuergerät – in der Regel ein Seriensteuergerät mit mehreren LIN-Bussen – angeschlossen wird. Somit ist nicht nur die Kommunikation auf einen Systembus zu realisieren, sondern es sind auch die LIN-Nachrichten sowie der LIN-Schedule und die LIN-Gateway-Tabelle des Seriensteuergeräts zu definieren. Bei der Integration entstehen also an den verschiedensten Stellen Fehlerquellen, die nur der Vernetzung geschuldet sind. Diese Integrationsleistung geht dann leider zu Lasten der in der Regel notwendigen Feinabstimmung der FAS-Funktion.

Mithin ist sorgfältig zu prüfen, ob es im Einzelfall nicht günstiger ist – auch wenn es lokal zu Kostenmehrungen kommen kann – auf Vernetzung zu verzichten und Sensorik sowie Aktorik direkt an die zentrale Steuereinheit für das FAS anzuschließen. Die Integrationskosten steigen nämlich bei höherer Vernetzung überproportional an, um die gleiche Absicherungstiefe der Funktion zu erzielen.

Die Einbindung der unterschiedlichen Fahrerassistenzfunktionen in eine Systemarchitektur muss einerseits Flexibilität in Bezug auf die Ausstattungsumfänge bieten, da die Kunden vielfach nur einzelne FAS-Systeme wählen und deren individuelle Kombination in der Architektur abbildbar sein muss. Andererseits muss die Architektur eine hohe Kostenmodularität unterstützen, da andernfalls bereits die Basisumfänge und nur gering ausgestatteten Varianten mit dem Ballast der Gesamtfunktionalität belastet werden.

9.5 Partitionierung von FAS-Funktionen auf Steuergeräte

Wie auch andere Funktionen werden die FAS-Funktionen in die Steuergeräte als zentrale Rechen- und Steuereinheiten der E/E-Systemarchitektur, in denen alle wesentlichen Aufgaben im Bordnetz abgearbeitet werden, integriert.

Die wesentlichen Aufgaben bei Fahrerassistenzsystemen sind hierbei:

- Sensordatenfilterung und -auswertung,
- Einlesen von Schaltern und Bedienelementen,
- Berechnung von Warnkriterien, Steuerungs- und Regelungsalgorithmen,
- Berechnung der Sensordatenfusion,
- Diagnose und Kalibrierung,
- Codierung länderspezifischer Ausprägungen,
- Ansteuerung von Aktoren oder Anzeigen.

In der Kombinatorik dieser Grundaufgaben werden die vielfältigen Funktionen im Kraftfahrzeug abgearbeitet, wie etwa Ansteuerung der Bremse, der Motorleistung oder Lichtfunktionen wie Kurvenlicht.

Die Steuergeräte als wesentliche Architekturelemente übernehmen in heutigen Kraftfahrzeugen

Hunderte von Einzelfunktionen. Im Kern eines nahezu jeden Steuergeräts befinden sich ein oder bei komplexen Funktionen auch mehrere Mikrocontroller. Dieser ist im Gegensatz zu den Mikroprozessoren mit separaten Speichern, Controllern etc. in den Personal Computern als eingebetteter Controller (engl. Embedded Microcontroller) ausgeführt. Eingebettet heißt, dass sich neben dem Mikroprozessor (heute hauptsächlich 16 Bit und 32 Bit-Prozessoren) auch die Speicher (RAM und ROM) und die Controller für die Buskommunikation, für die Ansteuerung der peripheren Funktionen, A/D- und D/A-Wandler, PWM usw. auf dem gleichen Siliziumchip befinden. Der Programmspeicher (ROM) ist hierbei in der Regel als Flashspeicher ausgeführt. Damit kann der Speicherinhalt gelöscht und wiederbeschrieben werden. Diese Funktionalität erlaubt es, während der Entwicklung wie auch während der Nutzungsdauer des Fahrzeugs die Funktionen in der Software zu ändern, zu aktualisieren oder ganz auszutauschen.

Steuergeräte waren in den Anfängen der Elektronik im Kraftfahrzeug gar nicht oder nur sehr gering untereinander vernetzt. Heute besitzen nahezu alle Steuergeräte einen oder mehrere Busanschlüsse.

Hierbei lassen sich grob folgende drei Grundtypen von Steuergeräten unterscheiden:

- Eingebettete Steuergeräte ECU (engl. embedded electronic control unit),
- Semi-eingebettete Steuergeräte,
- Rechnerknoten.

Eingebettete Steuergeräte zeichnen sich dadurch aus, dass die Hauptaufgaben eines Steuergeräts – Sensorauswertung, Algorithmenberechnung, Ansteuerung von Aktoren und Diagnose – sich in einem Steuergerät befinden und die Funktionen dort vorwiegend autonom ablaufen. In Verbindung mit der Buskommunikation deckt diese Konfiguration die meisten Anforderungen und Funktionalität im Fahrzeug gut ab. Es zeigt sich jedoch, dass das Nebeneinander von rechenzeitintensiven Aufgaben sowie dem Schalten/Treiben von hoher elektrischer Leistung in einem Steuergerät nicht immer unkritisch bezüglich Verfügbarkeits- und Sicherheitsaspekten zu bewerten ist. In solchen Fällen werden die Lastschaltelemente mit den dazugehörigen Treibern in separaten Modulen mit oder ohne eigene Intelligenz ausgelagert. Bei hoher Komplexität der Funktionen oder bei Bedarf redundanter Funktio-

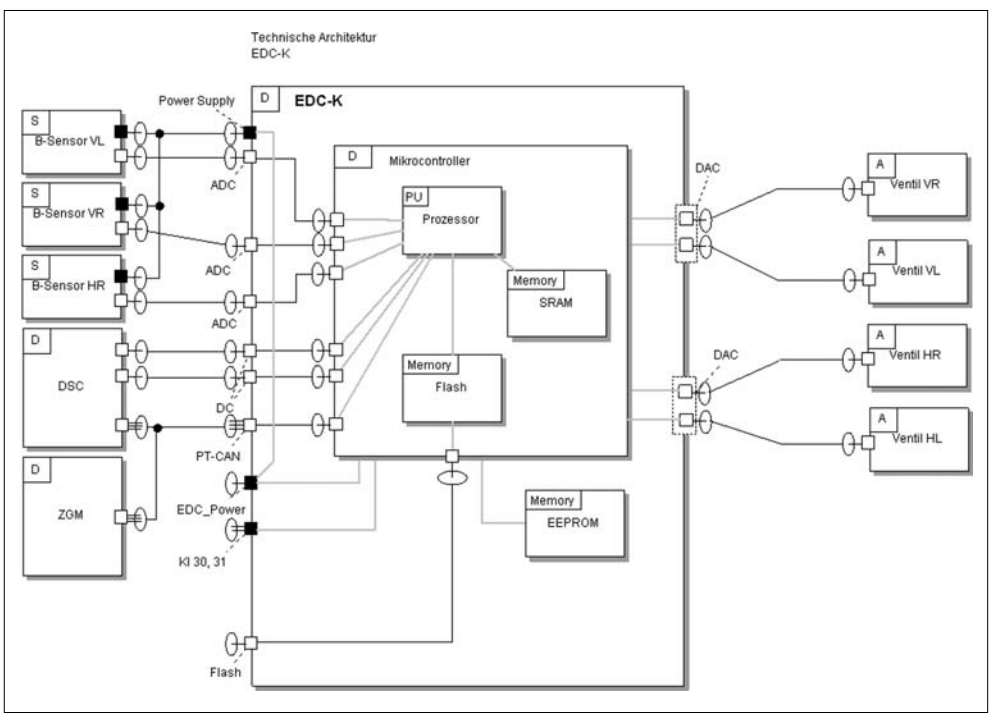


Bild 9-2: Technische Steuergeräte-Architektur einer Embedded ECU am Beispiel EDC-K (Elektronische Dämpfer Control – Kontinuierlich)

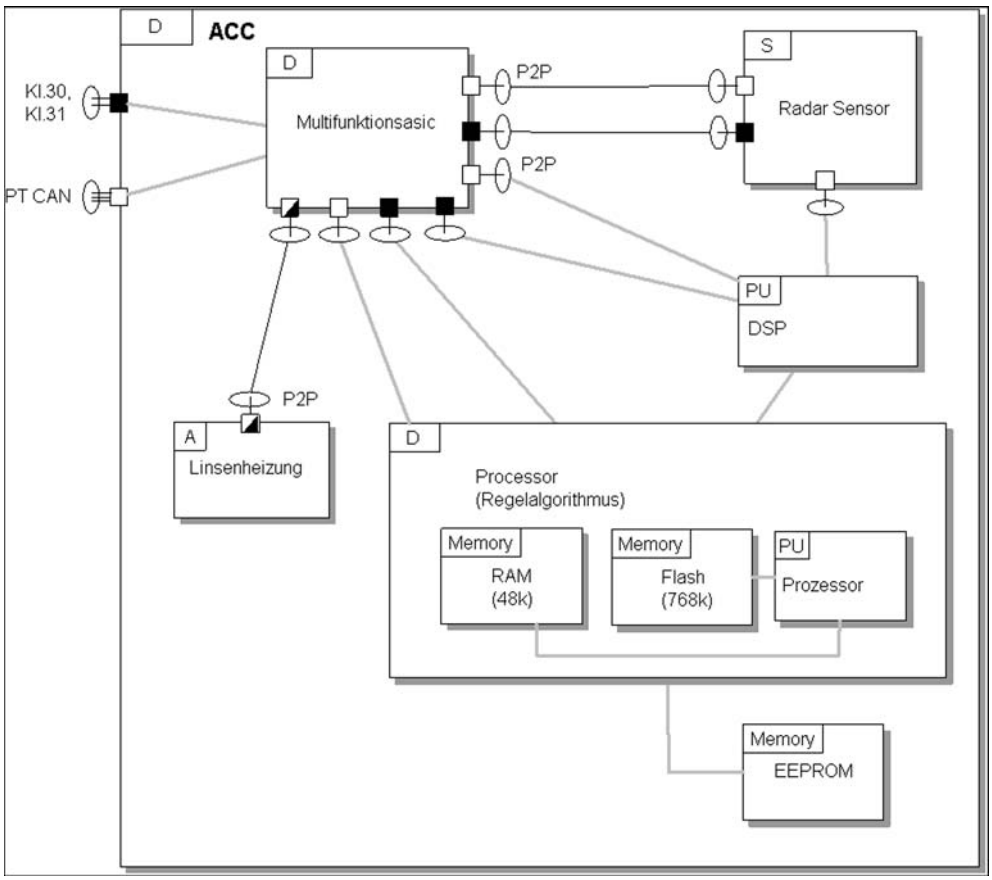


Bild 9-3: Technische Architektur des Steuergeräts Adaptive Cruise Control ACC (Typ semi-embedded ECU).

nalität für Sicherheitsfunktionen in einem Steuergerät werden mehrere Prozessoren in einem Steuergerät eingesetzt.

Ein typischer Vertreter eines eingebetteten Steuergeräts ist im **Bild 9-2** dargestellt.

In dem Steuergerät befindet sich ein eingebetteter Controller mit dem Prozessorkern, einem SRAM und einem Flashspeicher. An das Steuergerät angeschlossen sind drei analoge Sensoren und vier analoge Ventile, die den Druck in den Dämpfern je nach Straßenlage und fahrdynamischem Zustand oder vom Fahrer vorgewählten Grundeinstellungen ändern. Zusätzlich besitzt es noch einen High-Speed-CAN-Anschluss (500 kBd). Derartige Steuergeräte eignen sich gut für relativ einfache Anwendungen der Fahrerassistenz, wie die bekannte PDC-Funktion (Park Distance Control), die heute schon nahezu vollständig in Form eines ASICs in solche Steuergeräte mit integriert wird.

In semi-embedded Steuergeräten sind nahezu keine Treiberbausteine vorhanden. Die Sensoren und Aktoren werden meist als mechatronische Einheiten realisiert, die über Subbusse mit dem Steuergerät vernetzt sind. Die mechatronischen Elemente beheimaten i. d. R. auch die Signalvorverarbeitung sowie teilweise oder ganz die Ansteuerung der Aktorik und entlasten das dazugehörige Steuergerät von diesen Aufgaben. Damit steht im Steuergerät eine hohe Rechenleistung, basierend auf 32 Bit-Controllern verbunden mit hohem Speicherbedarf, siehe **Bild 9-3**, für komplexe FAS-Funktionen zur Verfügung.

So sind im ACC-Steuergerät nur noch solche Treiber enthalten, die unmittelbar mit der realisierten Funktion zu tun haben. Das sind in diesem Fall der Radarsensor, der für die adaptive Geschwindigkeitsregelung nötig ist, und die Linsenheizung für das Radar. Die Systemvernetzung mit anderen

Komponenten erfolgt quasi ausschließlich über Busse.

Eine typische Funktion, die häufig als Rechnerknoten im Fahrzeug realisiert wird, sind komplexe Gateways. Eine ähnliche Herausforderung stellt auch die Sensordatenfusion mit einer kamerabasierten Fahrerassistenzfunktion dar, da hierbei z. B. das Radar und die Linsenheizung in einem anderen Steuergerät integriert werden.

Dies führt dann zur Realisierung von Rechnerknoten. Zur Umsetzung von höheren Fahrerassistenzsystemen oder X-by-Wire-Systemen werden die Rechnerknoten in Zukunft häufiger anzutreffen sein. Dies begründet sich damit, dass sich viele neue Funktionen nur noch im Vernetzungszusammenhang von mehreren Steuergeräten realisieren lassen und zudem erhöhte Verfügbarkeits- und Sicherheitsanforderungen dazu zwingen, gezielt Redundanzen steuergeräteintern oder -extern aufzubauen.

Das gezeigte Aktivlenkungssystem setzt dies schon heute um, **s. Bild 9-4**.

Die Aktivlenkung basiert auf dem Prinzip der Überlagerungslenkung, bei dem die Lenkübersetzung gezielt über einen Elektromotor mit Getriebe in der Lenksäule verändert werden kann (s. Kap. 20 und 29). Das Steuergerät AFS (Active Front Steering) tauscht dabei intensiv Daten mit den Steuergeräten DSC (Dynamische Stabilitäts Control) und DME (Digitale Motor Elektronik) über den Systembus Pt-CAN (500 kBd) aus. Ferner benötigt es die doppelte Sensorik: zwei Sensorcluster, die Gierratensensor und Beschleunigungssensor integrieren, und zwei Lenkwinkelsensoren. Da diese Sensoren auch vom DSC benötigt werden, sind diese Sensoren an dem Subbus F-CAN (500 kBd) angeschlossen. Das AFS-Steuergerät ist im Grunde nur noch ein Rechnerknoten mit einer Doppelprozessorarchitektur, wobei der eine Prozessor die wichtigsten Berechnungsergebnisse des Hauptprozessors überwacht. Sind die Ergebnisse nicht identisch, so fällt das Aktivlenkungssystem in den sicheren Zustand zurück: Die Lenkung verhält sich so wie eine konventionelle Lenkung mit fester Lenkungsübersetzung.

Ein weiterer Vorteil beim Einsatz von zentralen Rechnerknoten ist, dass dort hinreichend hohe Rechnerleistung auch für sehr komplexe Fusion der Sensordaten zur Verfügung gestellt werden kann.

9.6 Vernetzungstechnologien

Ein weiteres zentrales Schlüsselelement einer Systemarchitektur sind die Vernetzungstechnologien, das heißt Busse und ihre entsprechenden Übertragungsprotokolle. Man unterscheidet die Busse primär hinsichtlich ihrer zugrunde liegenden Buszugriffsverfahren nach deterministischen (FlexRay, byteflight, TTP) und arbitrierenden Buszugriffsverfahren (CAN, LIN, MOST). Weiterhin können einige Bussysteme mehrere logische Datenkanäle öffnen, um synchron große Datenmengen für Audio oder Video zu übertragen (MOST).

Die zentralen Busse, die heute in Kraftfahrzeugen eingesetzt werden, sind der CAN-Bus für die Domänen Antrieb, Fahrwerk und Karosserie, der MOST-Bus für die Domäne Multimedia und neuerdings der FlexRay-Bus für Anwendungen im Fahrwerks- und Antriebsbereich. Daneben gibt es noch eine Reihe von Subbussen, die für die lokale Anbindung von einfacheren Steuergeräten zur Anwendung kommen. Hier hat vor allem der LIN-Bus an Bedeutung gewonnen. Die wesentlichen Anforderungen an Busse im Kraftfahrzeug sind nachfolgend zusammenfassend dargestellt.

Wichtige Anforderungen an Bussysteme aus Sicht von Fahrerassistenzanwendungen sind:

Bandbreite (Datenübertragungsrate): Insbesondere für die Übertragung von Videosignalen der Kameras werden hohe Übertragungsbandbreiten erforderlich.

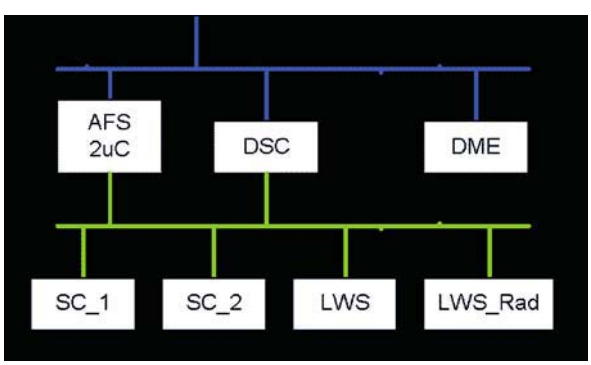


Bild 9-4
Vereinfachte technische Architektur des Aktivlenkungssystems mit AFS-Steuergerät

Latenzzeiten: Bei Systemen mit aktivem Eingriff in die Fahrdynamik, wie etwa bei der Automatisierung von Einparkvorgängen oder bei Kollisionsvermeidungssystemen, muss eine sorgfältige Betrachtung der möglichen Latenzzeiten erfolgen; ggf. sind deterministische Busprotokolle und Abschätzungen der *worst case execution time* der Steuergeräte in Betracht zu ziehen.

Jitter: Eine Reihe von Anwendungen, etwa in der Sensordatenfusion, benötigen zur Einhaltung der Funktionssynchronität sehr genaue Erneuerungszyklen des Datenaustauschs.

Übertragungssicherheit: auch in der rauen Umgebung im Fahrzeug mit den vielen eingestrahlten und eingekoppelten Störungen hinreichende Robustheit der Datenübertragung auch ohne aufwendige Abschirmmaßnahmen.

Leitungslänge: Mit der steigenden Übertragungsrate der Busse steigen die Anforderungen an die physikalischen Eigenschaften der Busverbindungen und Bustreiber, wie Impedanz, Dämpfung, Übersprechen etc. zum Teil erheblich. Die gewählte Topologie der Busverbindungen muss deshalb stets sorgfältig dimensioniert und durch Simulation und Messungen abgesichert werden.

9.7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Potenzial, die Sicherheit und den Kundennutzen im Fahrzeug durch Funktionen der Fahrerassistenz zu erhöhen, ist bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Die Weiterentwicklung der Sensortechnologien und ausgeklügelte Gestaltung der Systemarchitektur werden der weiteren Perfektionierung und Erweiterung der FAS-Funktionen helfen. Diese werden nach der Lernkurve rasch den Einzug auch in Fahrzeuge in unteren Marktsegmenten finden. Durch diese Fortschritte werden die heutigen Systemgrenzen zwischen den Domänen „Aktive und Passive Sicherheit“ und „Fahrerassistenz“ in den Hintergrund treten und weitere Synergien erschlossen werden.

Bei der Vielzahl von Funktionen und der zunehmenden Realisierung von sehr komplexen Funktionen mit Sicherheitsrelevanz werden in Zukunft verstärkt Rechnerknoten zum Einsatz kommen, die die relativ komplexe Sensorfusion beheimaten. Diese können mittelfristig dann auch die zentralen Instanzen eines Systemmanagements der diversen FAS-Systeme sowie die redundanten Pfade bei sicherheitskritischer Funktion aufnehmen. Dies wird deshalb zunehmende Bedeutung gewinnen, da immer mehr Funktionen auf die gleichen Aktoren zugreifen. Hier wird in Zukunft eine Koordinationsinstanz dafür sorgen müssen, dass die Anforderungen an die Aktorik situationsgerecht priorisiert werden. Für derartige leistungsfähige Rechnerknoten werden verstärkt neue Multicore-Prozessorarchitekturen mit den Vorteilen hoher Rechnerleistungen ohne die Nachteile bezüglich Zuverlässigkeit und Verlustleistung zum Einsatz kommen. Das derzeitige OSEK-Betriebssystem, wie es sich für heutige Steuergeräte im Einsatz befindet, ist allerdings für Multicore-Steuergeräte nicht geeignet. Hier sind neue Betriebssystemkonzepte ebenso erfoderlich wie auch neue Methoden des Softwaredesigns, um mit dem prinzipiellen Vorteil der Parallelisierbarkeit von Tasks zweckmäßig umzugehen. Entsprechende Entwicklungsarbeiten sind firmenübergreifend angestoßen und werden in naher Zukunft geeignete Lösungen liefern.

Quellenverzeichnis

[1] *Naab, K.*: Intelligente Sensorik künftiger Fahrerassistenzsysteme. GMM-Fachtagung „Technologien in automobilen Anwendungen“, VDE-Kongress 2004

Glossar

Begriff	Synonyme	Erklärung
ABS	ABV (Automatische Blockierverhinderung)	Anti-Blockier-System, verhindert durch radindividuellen Bremskraftabbau zu hohen Bremsschlupf und ermöglicht höhere Fahrstabilität und Lenkbarkeit beim Bremsen.
Adaptive Cruise Control (ACC)	Distronic, Automatische Distanzregelung (ADR), Abstandsregeltempomat (ART), Active Cruise Control (ACC)	In der Norm ISO 15622 von der ISO/TC204/WG14 definierte Erweiterung der →Cruise Control durch automatisches Anpassen an die Geschwindigkeit eines von einem oder mehreren Sensoren erkannten voraus fahrenden Fahrzeugs durch Eingriffe in Motorsteuerung und Bremse.
ADAS		Advanced Driver Assistance Systems („Fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme“); Fahrerassistenzsysteme mit Umfelderfassung und eigenständiger Informationsverarbeitung, die zu Empfehlungen, Warnung und/oder Eingriffen führt.
ADAS Horizon		Künstlicher Horizont für →ADAS-Anwendungen; basierend auf einer digitalen Karte und einem Ortungssystem wird der Verlauf der Fahrbahn mit Attributen zu Beschilderung oder Topologie und Verzweigungen für die nähere Zukunft vorhergesagt.
ADR		Automatische Distanzregelung: alternative, von Volkswagen verwendete Bezeichnung von →Adaptive Cruise Control
ANB		→Automatische Notbremse
ART		Abstandsregeltempomat: alternative Bezeichnung der →Adaptive Cruise Control
ASR	TCS (Traction Control System)	Antriebsschlupfregelung: Verhindert durch radselektiven Bremseingriff und Motoreingriff zu hohen Antriebsschlupf. Ermöglicht höhere Fahrstabilität und Lenkbarkeit beim (forcierten) Gas geben und eignet sich als Traktionshilfe, die in dieser Funktion als elektronisches Sperrdifferenzial (ESD) bezeichnet wird.
Automatische Notbremse	ANB, Collision Mitigation System (CMS), Emergency Brake	Löst eine Vollbremsung aus, wenn aus den Daten der Umfeldsensorik ein Ausweichen ausgeschlossen wird. Kann meistens die Kollision nicht mehr verhindern, aber den Kollisionsschaden lindern.
Autonomes Einparken		Vollständig autonome Ausführung einer Einparkaufgabe
AUTOSAR		Abkürzung für „AUTomotive Open System Architecture“; internationaler Verbund mit dem Ziel, einen offenen Standard für Elektrik-/Elektronikarchitekturen im Kraftfahrzeug zu etablieren.
BAS		→Bremsassistent
BLIS		Blind Spot Information System: Volvo-Bezeichnung eines Systems zur →Fahrstreifenwechselentscheidungsunterstützung, geht in Funktionalität etwas über eine reine →Totwinkelerkennung hinaus.

Begriff	Synonyme	Erklärung
Bluetooth		Standard für kurzreichweitige, drahtlose Kommunikation zwischen Endgeräten im Frequenzbereich von 2,4 GHz
Brake-by-Wire		Fremdkraftbremse ohne energetische Kopplung zwischen Bremspedal und Radbremsen
Bremsassistent	Brake Assist, BAS	Hebt bei Panikbremsungen automatisch das Bremsdruck-Niveau an, bis die ABS-Regelung einsetzt. Auslösung bei Überschreiten einer Pedalgeschwindigkeitsschwelle.
CAN		Controller Area Network (serieller Datenbus für den digitalen Datenaustausch zwischen Steuergeräten im Fahrzeug bis ca. 500 kBit/s)
CCD		Charge Coupled Devices: Bildsensoren, basierend auf Ladungsverschiebungselementen ähnlich einer Eimerkettenleitung; bisher dominierende elektronische Bildsensortechnik.
CMOS		Complementary Metal Oxid Semiconductor: heute dominierende Halbleitertechnik. Kann auch für Bildsensoren verwendet werden.
CMS		→Automatische Notbremse
Collision Avoidance		Vermeidet durch Notbremsung und/oder Ausweichen eine Kollision, bisher Fernziel für ein unfallvermeidendes Fahrzeug.
Convoy	Platooning	Dicht aufeinander folgende Fahrzeugkolonnen auf einem dafür vorgesehenen Fahrstreifen
Cruise Control	Fahrgeschwindigkeitsregler (FGR), Tempomat, Tempostat, Geschwindigkeitsregelanlage (GRA)	Regelt die Fahrgeschwindigkeit über Eingriff in die Motorsteuerung auf den vom Fahrer gesetzten Wert.
Digitale Karte	engl.: digital map	Maßgebundenes und strukturiertes Modell räumlicher Bezüge. Die digitale Karte ist ein digitales Modell der Realität. Digitale Karten für die Fahrzeugnavigation beinhalten Informationen für Ortung, Routensuche und Zielführung sowie Verweise zum Zugriff auf die Daten.
Disc Thickness Variation (DTV)		Auswaschungen und Dickenschwankungen an Bremsscheiben
Drehratensensor	Gyro	Sensor zur Erfassung der Drehrate (gemessen in Winkel/Zeit) im Automobil zur Messung der Drehung um die Hochachse und die Wankachse.
Distronic		Alternative, von Mercedes verwendete Bezeichnung von →Adaptive Cruise Control
Dopplereffekt		Veränderung der Frequenz durch Relativgeschwindigkeit zwischen Objekt und Beobachter. Bekannt auch als Tonhöhenverschiebung bei Vorbeifahrt eines Fahrzeugs.
Dynamic Stability Control (DSC)		→ESP
Dynamische Zielführung	engl.: dynamic route guidance	→Zielführung auf Basis aktueller Verkehrslageinformationen
EBS		Elektronisches Bremssystem, elektropneumatisches →Brake-by-Wire im Nutzfahrzeugbereich

Begriff	Synonyme	Erklärung
E-Gas		Elektronisches Gas-Pedal: besitzt keine mechanische Verbindung zwischen Gaspedal und Drosselklappe.
EHB	SBC, nasses Brake-by-Wire	Elektrohydraulische Bremse, elektrohydraulisches →Brake-by-Wire mit hydraulischem Notlaufkonzept, vorübergehend als Sensotronic Brake Control in Mercedes SL und E-Klasse verbaut, jetzt noch in Hybridfahrzeugen (z.B. Toyota Prius, Ford Escape) und Lexus LS verbaut
Eindeutigkeitsbereich		Entfernungsbereich, in dem gemessene Distanzen einer eindeutigen Entfernung zugeordnet werden können. Siehe auch Modulationsfrequenz.
Electronic Stability Control (ESC)		→ESP
EMB	trockenes Brake-by-Wire	Elektromechanische Bremse, rein elektromechanisches →Brake-by-Wire mit je einem elektromotorischen Steller am Rad. Benötigt fehlertolerante Steuerung und Energieversorgung. Schon für mittelschwere Fahrzeuge ist zudem ein 42-V-Bordnetz erforderlich.
EPB		Elektrische Parkbremse
EPH		Einparkhilfe
ESP	FDR (Fahrdynamikregelung), VDC (Vehicle Dynamic Control), DSC (Dynamic Stability Control)	Vereinigung von →ABS, →ASR und einer Giermomentenregelung. Versucht innerhalb der physikalischen Grenzen durch radindividuelle Bremseingriffe das Fahrzeug in die Richtung zu „zwingen“, die der Fahrer mit dem Lenkrad vorgibt. Greift dazu auch in den Antrieb ein.
FAS		Kurzform für Fahrerassistenzsystem
Fahrdynamikregelung (FDR)		→ESP
Fahrstreifenverlassenswarnung	Lane Departure Warning; umgangsspr.: Spurverlassenswarnung	Warnt vor unbeabsichtigtem Überqueren von Fahrstreifenmarkierungen mit akustischen oder haptischen Mitteln.
Fahrstreifen	umgangsspr.: „Spur“	Fachterminus für die Aufteilung der Fahrbahn, durch Fahrstreifenmarkierungen angezeigt.
Fahrstreifenwechselentscheidungsunterstützung	Lane Change Decision Aid, umgangsspr.: Spurwechselunterstützung	Informationssystem zur Unterstützung eines Fahrstreifenwechsels durch Beobachtung eines seitlichen Korridors durch Sensoren und Anzeige in der Blickrichtung zum Seitenspiegel. Zwei Funktionsstufen werden unterschieden: →Totwinkelerkennung, die „nur“ den direkten Seitenbereich des Fahrzeugs beinhaltet und eine Erkennung von sich schnell annähernden Fahrzeuge im weiteren Rückraum.
FIR		Fernes Infrarot (ca. 10 μm Wellenlänge), Bereich der Wärmestrahlung bei Raumtemperatur
FlexRay		Flexible Ray; deterministisches BUS-System für sicherheitskritische Fahrzeuganwendungen mit hoher möglicher Datenrate
Frequenzmodulation		Kennzeichnungs-, (Kodierungs-) und Auswerteverfahren zur Messung von Abständen und Relativgeschwindigkeiten, bei denen die Momentanfrequenz des Sendesignals zeitlich variiert wird.

Begriff	Synonyme	Erklärung
Frontalkollisions-warnung	Forward (Vehicle) Collision Warning	Warnt vor drohender Frontalkollision mit akustischen, haptischen oder kinästhetischen Mitteln.
Full Speed Range Adaptive Cruise Control (FSRA)		In der Norm ISO 22179 von der ISO/TC204/WG14 definierte, über den ganzen Geschwindigkeitsbereich mögliche →ACC-Funktion, die auch eine einfache →Stop&Go-Funktion ermöglicht. Berücksichtigt i.a. nur Standziele, die vorher als Fahrzeuge klassifiziert wurden.
Füllfaktor	FF	Verhältnis der lichtempfindlichen aktiven Fläche zur gesamten aktiven Fläche
Galileo		Von der EU geplantes →GNSS
GDF		Geographic Data Files: standardisiertes internationales Austauschformat der →digitalen Karte
GLONASS		Global Navigation Satellite System, von Russland betriebenes →GNSS
GNSS		Global Navigation Satellite System, allgemeiner Begriff für →GPS, GLONASS, Galileo
GPS		Global Positioning System, oft auch als Navstar GPS bezeichnet; von den USA betriebenes →GNSS
Hintergrundlichtunterdrückung	SBI	Suppression of Background Illumination, d.h. aktive oder passive Unterdrückung der Gleichanteile des empfangenen Lichtsignals, eingesetzt bei →Time-of-Flight Cameras
HBA		Hydraulischer →Bremsassistent, Druckerhöhung erfolgt mit der Pumpe des →ESP- oder →ASR-Hydroaggregats.
HMI		Human Machine Interface, Mensch-Maschine-Schnittstelle
Integrationszeit		Belichtungszeit einer Phasenmessung
ISO		International Standardisation Organisation
Kartenstützung	Map-Matching, Karteneinpassung	Unterstützung der →Ortung durch Vergleich von möglichen Aufenthaltsorten (z.B. Straßen auf einer →digitalen Karte) und der aktuell aufgrund der →Koppelortung ermittelten Position. Dadurch wird die Korrektur von Offsetfehlern möglich.
Koppelortung	Koppelnavigation engl.: dead reckoning	Stückweise Integration von aufeinander folgenden Wegabschnitten gekennzeichnet durch die Länge und den absoluten Kurswinkel (beim Kfz meistens Gierwinkel). Benötigt →Odometer und Winkelsensor, beim heutigen Kfz werden dafür Raddrehzahlsensoren und ein die Gierrate messender →Drehratensensor verwendet.
Kreuzecho		Verfahren, bei denen die Laufzeit gemessen wird, die zwischen dem Senden eines Signals von einem Sensor und dem Empfang an einem anderen Sensor vergeht. Ermöglicht zusammen mit den Laufzeiten der Einzelsensoren eine zuverlässigere →Triangulation, insbesondere bei breiten Hindernissen.
Lane Departure Warning (LDW)		→Fahrstreifenverlassenswarnung

Begriff	Synonyme	Erklärung
Lane Keeping Support (LKS)	Heading Control	Unterstützung beim Halten des Fahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens durch Lenkmomentenüberlagerung bei Annäherung an die Fahrstreifenmarkierung.
Lane Change Decision Aid	LCDA	englisch für →Fahrstreifenwechselentscheidungs-unterstützung
Laufzeitverfahren	ToF	→Time-of-Flight-Verfahren
LDW		→Fahrstreifenverlassenswarnung
Low Speed Following (LSF)		(Japanischer) Ansatz einer einfachen Staufahrunterstützung; folgt nur vom Fahrer ausgewählten Zielfahrzeugen im Nahbereich.
Mikrowellen		Funkwellen mit Wellenlängen von etwa 1 cm bis 10 cm (= 3 bis 30 GHz)
mm-Wellen		Funkwellen mit Wellenlängen von etwa 1 mm bis 10 mm (= 30 bis 300 GHz)
Modulationsfrequenz		Frequenz, mit der Strahlung (inkl. Licht) moduliert wird, um eine Laufzeitmessung über die Phasenauswertung zu ermöglichen. Wird bei →Time-of-Flight-Cameras verwendet.
monokular		einäugig(es Kamerasystem)
Nachtsichtsysteme	NightVision	Informationssystem, das dem Fahrer auf einem Display (inkl. Headup-Display) die Infrarot-Spektral-Ansicht ermöglicht. Der Infrarotanteil wird entweder mit einem Infrarot-Fernlicht erzeugt (→NIR) oder resultiert aus der Wärmestrahlung (→FIR).
Navigation		Ursprünglich: Schiff führen (lat.: navigare), die Gesamtheit der Funktionen →Ortung, →Routensuche und →Zielführung
NIR		Nahes Infrarot (ca. 700–1000 nm Wellenlänge)
Odometer	Hodometer	Wegmesser (griech.: hodos = Weg)
Optischer Fluss		Verfahren der Bildverarbeitung, das die Verschiebung von zu einander korrespondierenden Bildpunkten in einer Bildfolge auswertet.
Ortung	engl.: Positioning	Bestimmung der momentanen Position, Teilfunktion der →Navigation
Parkpilot		→EPH
Parktronic		→EPH
PBA		Pneumatischer →Bremsassistent, Druckerhöhung durch pneumatikventilgesteuerten Bremskraftverstärker
PDC		→EPH
Photonic Mixer Device	PMD	PhotoMischDetektor, alternative Bezeichnung von →Time-of-Flight Cameras
Platooning		→Convoy
PROMETHEUS		Programme for European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety: von 1987 bis 1994 betriebenes vorwettbewerbliches europäisches Forschungsprogramm zur Erforschung von Verkehrstelematiktechniken

Begriff	Synonyme	Erklärung
Protector		Forschungssystem der Daimler AG mit elektronischer Knautschzone ähnlich einer →Automatischen Notbremse
Pulsmodulation		Kennzeichnungs-(Kodierungs-) und Auswerteverfahren, wird bei aktiven umfelderfassenden Sensoren zur Messung von Abständen verwendet. Dazu wird ein kurzer Puls ausgesendet.
Radar		Radio Detection and Ranging, auf Funkwellen (→Mikrowellen und→mm-Wellen) basierendes Messprinzip zur Ermittlung von Objekten und deren Position und Relativgeschwindigkeit
RDS-TMC		Abkürzung für Radio Data System – Traffic Message Channel, von Radiosendern unterstützter Dienst für digitale Verkehrslageinformation
Reflektivität		Verhältnis von reflektierter Leistung eines Körpers zur bestrahlten Leistung
Routensuche		Ein Routensuchsystem bestimmt aus der IST-Position und der Ziel-Position den günstigsten Weg zum Ziel durch Zugriff auf eine digitale Karte. Dieser günstigste Weg wird durch eine Folge von Straßen oder Straßenstücken beschrieben. Ergebnis der Routensuche ist also eine Optimalroute (im Sinne eines Optimierungskriteriums).
SD-Karte	SD Memory Card	Kurzform für „Secure Digital Memory Card“ (digitales Speichermedium, das nach dem Prinzip der Flash-Speicherung arbeitet)
Semi-Autonomes Einparken		Einparktrajektorie wird durch umfelderfassendes System vorgegeben. Die Umsetzung wird durch Information und ggf. durch Eingriffe in Lenkung oder Bremse unterstützt. Fahrer behält die Verantwortung über die Ausführung der Einparkaufgabe.
Spur	engl.: Track	1: Abstand der Radaufstandspunkte einer Achse (Fahrwerk), auch Spurbreite genannt, 2: Abdruck der Räder (z.B. Spurrinne, Spurrille) 3: Fährte, Trajektorie, Kurs, Bewegungsbahn von bewegten Objekten nicht aber: Fahrstreifen
State of Charge (SoC)		Batterie-Ladezustand
State of Function (SoF)		Batterie-Funktionszustand (SoC + SoH = SoF)
State of Health (SoH)		Batterie-Alterungszustand
Steer-by-Wire	SbW	Elektromechanische oder elektrohydraulische Ausführung der Lenkung ohne energetische Kopplung von Lenkbetätigung (Lenkrad) und Radverstellung. Benötigt für schwerere Fahrzeuge mindestens 42 V Spannung. Besitzt die höchsten Sicherheitsanforderungen und erfordert daher ein hohes Maß an Redundanz für eine fehlertolerante Auslegung.
Stereo		Empfang mit zwei Sensoren und Auswertung der Verschiebung (Disparität) von korrespondierenden Mustern
Stop&Go		Sammelbegriff für verschiedene Formen der Staufahrtunterstützung →Low Speed Following, Full Speed Range Adaptive Cruise Control.

Begriff	Synonyme	Erklärung
TFT-Display		Thin Film Transistor-Display (spezielle Technologie für Flüssigkristall-Displays; die Technologie erlaubt hohe Bildwiederholraten im Gegensatz zur STN- oder DSTN-Technologie)
Time-of-Flight	ToF	Laufzeit (zwischen Aussendezeitpunkt und Empfang); wird bei Umfeldsensoren zur Abstandsbestimmung verwendet.
Time-of-Flight Camera	Photonic Mixing Device	Mischung von digitaler (Video-)Kamera und Lidar: Reflektiertes Licht von einem modulierten Sendestrahl (aktive Beleuchtung) wird mit speziellen Fotodioden nicht nur empfangen, sondern auch schon gleich gemischt, wodurch eine direkte Laufzeitbestimmung (→Time-of-Flight) und somit Abstandsmessung möglich ist.
Totwinkelerkennung (TWE)	Blind Spot Detection, Tote-Winkel-Detektion (TWD)	Einfachste Form der Fahrstreifenwechselentscheidungsunterstützung. Detektiert Fahrzeuge im Totwinkelbereich neben dem Egofahrzeug.
Triangulation		Verfahren zur Bestimmung der Lage eines Objekts unter Verwendung entweder zweier Abstände (Schnittpunkt von zwei Kreisen) oder zweier Winkel (Schnittpunkt der Winkelgeraden)
TTC		Time-to-Collision: Zeit bis zum Aufprall; bei unbeschleunigter Bewegung = Abstand/Relativgeschwindigkeit
TLC	TTLC	Time-to-Lane-Crossing: Zeitdauer bis zum Überfahren der Fahrstreifenmarkierung = seitlicher Abstand / Quergeschwindigkeit relativ zur Fahrstreifenmarkierung
TWE	Blind Spot Detection, BLIS	→Totwinkelerkennung
Überlagerungslenkung	Active Front Steering, Aktivlenkung	Überlagert zum vom Fahrer eingestellten Lenkwinkel einen elektronisch steuerbaren Lenkwinkel. Auf diese Weise kann eine variable Lenkübersetzung erreicht und eine fahrdynamische Korrektur eingestellt werden.
Ultraschall		Schallwellen oberhalb des vom Menschen hörbaren Spektrums (also > 20 kHz)
UMTS		Universal Mobile Telecommunication System (Mobilfunkstandard der 3. Generation; erlaubt Bruttodatenrate bis 2 Mbit/s)
USB		Universal Serial Bus (serieller Datenbus mit Bruttodatenraten von bis zu 480 Mbit/s; im Fahrzeug werden heute üblicherweise Bruttodatenraten bis 12 Mbit/s umgesetzt)
Vehicle Dynamic Control (VDC)		→ESP
WiFi		Wireless Fidelity; wird quasi als Markenname für WLAN-Produkte verwendet; die eingesetzte Technologie ist identisch wie bei WLAN.
WLAN		Wireless Local Area Network; drahtloser Verbindungsstandard mit standardisierten Bruttodatenraten bis 54 Mbit/s; wird zur drahtlosen Vernetzung von PCs eingesetzt.
X-by-Wire		Fremdkraftsysteme mit energetischer Entkopplung der Betätigung (Bedienung) und der Ausführung. Beispiele: →EHB, EMB, SbW, E-Gas

Begriff	Synonyme	Erklärung
Zielführung	Route guidance	Kursvorgabe für das Erreichen des Ziels gemäß der durch die →Routensuche bestimmten Weges bei der durch die →Ortung ermittelten Position.

Sachwortverzeichnis

1-Prozessorkonzept 304
24 Ghz-Radarsensor 568
2D-Mischer 191
30-Meter-Auto 627
3D-Bildverarbeitung 194
3D-Kamera 191
3D-Sensorik 187
3D-ToF-Kamera 197
3D-Wahrnehmung 187

A
Abberation, chromatische 203
Abbiegemanöver 442
Abblendlicht 454 f., 457, 460 ff.
Abdeckungsrate 348
Ablage 545
ABS (Anti-Blockiersystem) 250, 271, 275, 285, 356, 360 ff., 410, 424
ABS, Off-Road 430
ABS-Ventil 428
Abstand 491
Abstandsmessung 126, 145
Abstandsregelung 590
Abstandssensor 176
Abstimmungsraum, probabilistischer 229
Abstrahlenergie 181
ACC (Adaptive Cruise Control) 35, 43, 90, 478 ff., 588
ACC mit Stop&Go 480
ACC Plus 480
ACC-Information 323
ACC-System 323, 550
Achse, optische 200
Active Front Steering (AFS) 91, 398
Active Rear Axle Kinematics (ARK) 398
AdaBoost-Maschine 224
Adaptationsleuchtdichte 453
Adaption 468
adaptive Geschwindigkeitsregelung (ACC) 276
ADASIS 612
A-Double-Kombination 436
Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) 38
Advanced Lane Departure Warning-System (ALDW) 549, 551
AFIL 547
AFS-Funktion 461
AFS-Lichtverteilung 462
AFS-Scheinwerfer 457
Akkommodation 468
Akquisitionsgeschwindigkeit 238
AKTIV 597
Aktivlenkung 91, 299
Aktor 558
Aktorregelung 303
Akzeptanz 55, 517, 637, 641
ALI 599
Allradlenkung 443
Alter 8
Ampelassistenz 574
Anfahrhilfsfunktionen 271
Anforderungen, gesetzliche 95
–, klimatische und dynamische 97
Anhalteregelung 510
Anhängerbetrieb 423
Anhängersystem 430
Annäherungsstrategien 509
AnnieWAY 658
Anordnung, räumliche 319
Anpassbarkeit 319
Ansatz, merkmalspunkt- und körperteilbasierter 224
–, modellbasierter 218
–, systemorientierter 224
Antikollisionssysteme 73
Antizipationszeit 18
Antriebs-Schlupfregelung (ASR) 356, 360 ff., 415, 426
Anzeigen 316
–, Auswahl von 323
Application Specific Integrated Circuits (ASIC) 234
Applikationsprozess 442
Arbeitsmodell 314
Arbitrierung 654
Architektur 86, 239, 634
–, dezentrale 243
–, hybride 244
–, zentrale 244
Architekturmuster 237, 243
Assoziation 180
Astigmatismus 203
Audi Side Assist 568
Auditory Icon 352
Aufbau 622
Aufgabenangemessenheit 318
Auflösung 223
–, absolut 106
Aufmerksamkeit 5
Aufmerksamkeitskontrolle 550
Aufmerksamkeitsressource 344

Aufmerksamkeitssteuerung 234
–, stereobasierte 232
Augenbewegung, 468
Augmented Reality (AR) 76, 80
Augmented-Reality-Darstellung 469
Ausführen, korrektes 307
Ausführung, lenkwellenfeste 307
Auslassventil (stromlos geschlossen, SG-Ventil) 257
Ausparken 477
Auswahlmatrix 94
Ausweichbahn 635
Ausweichmanöver 560, 636, 644
Ausweichverhalten 523
Autobahnlicht, 457
Automatic Stability Control (ASC) 415
Automation, kooperative 647
Automatisierung 84
Automobil-Elektronik (AE) 620
Avalanchedioden 175
Azimutwinkel 508
Azimutwinkelbestimmung 146, 149

B
Bahnführung 33, 439
Bahnführungsassistenz 582 ff.
Baseline 352
Basis 208
Baustelle 559
Bayes-Filter 212
B-Double-Kombination 436
Bedien- und Anzeigekonzept 86
Bedienaufgabe 325
Bedienelement 315, 325 ff.
–, Auswahl 322
Bediengenauigkeit 326
Bediengeschwindigkeit 326
Bedienhäufigkeit 327
Bedienkomfort 327
Bedienkonzept 664
Bedien-Paradigma 664
Bedienteilart 326
Bedienungsanleitung 570
Bedienweg 328
Bedienwichtigkeit 327
Bedienwiderstand 328
Behälterwarneinrichtung 254
Beherrschbarkeit 30
Beherrschung 31
beladen/leer-Verhältnis 423
Belagverschleiß 254
Belegungsgitter 661
Beleuchtungsstärke 453 f.
Berstschutz 107
Berufskraftfahrer 582
Beschleunigungsprüfung 105
Beschleunigungssensor 98
Beschleunigungssignal 106
Beschleunigungsüberschlag 417
Betriebs- und Feststellbremse 256
Betriebsbremsen 585
Betriebsdauer 100
Beurteilungsleistungen 12
Beurteilungszeitraum 351
–, Bewertungskriterien 351
Bewegungsstereotypen 328
Bewegungstrajektorie 207
Bewertungsverfahren 69, 74
Beyond NCAP 28
Biegeschwingung 113
Bildverarbeitung 469, 545, 559
Bildvorverarbeitung 202
Bildsensor 198
Binomialfilter 204
Bitumenfuge 546
Blattfederung 422
Blendbeleuchtungsstärke 453
Blend-by-Wire 312
Blendlichtquelle 452 f.
Blendung 452, 454, 463
–, psychologische 456
Blickabwendungszeit 468
Blickwinkelinvarianz 224
Blind Spot Information System (BLIS) 566
Blinkerhebel 565
Block-Matching 207
Bootstrapping 228
Bordnetz 85
Bot Dots 548
Brake Blending 268
Brake-by-Wire 271, 629
Breitbandrauschprüfung 101
Bremsassistent 59, 524
Bremseingriff 635
–, radselektiver 445
–, schwacher 536
–, starker 537
Bremsendiagnose 430
Bremskraft-Modulator 250
Bremskraftverstärker, aktiver 252
Bremskraftverteilung 409
Bremslenkmoment 408
Bremsmanöver 636
Bremsnickausgleich 409
Bremsomat 588
Bremsruck 352
Bremssystem, elektromechanisches (EMB) 271
Bremsverhalten 639
Brenngrenze 417
Bündelung (Clustering) 149

Bus 91
Bustechnologie 86
byteflight 91

C
CAN 91
CAN, High-Speed- 284
CAN-Bus 277
CAN-Schnittstelle 102
CAN-Signal 483
Canny-Kantendetektor 205
Car-to-Car-Kommunikation 617
Car-to-Infrastructure-Kommunikation 617
CCD-Kamera 465
CCD-Matrix 191
CCD-Sensor 199
Chamfermatching 230, 233
Chassisregler 631
Chirp Sequence Modulation 139
Circularspline 304
CMOS-Kamera 465
CMOS-Sensor 192
CMOS-Technologie 199
Code of Practice 330
Codierungsaufwand 329
Collision Warning 536
Combined Brake Sytems (CBS) 410
Combiner 469
COMUNICAR 37
Conduct-by-Wire (CbW) 647, 651
Consumer-Elektronik (CE) 620
Cornermodul 629
Curietemperatur 110
Customer Relationship Management 619
CW-Laufzeitmessung 197
CW-Modulation (Continuous Wave) 189

D
Dampfblasenbildung 254
DARPA Urban Challenge 2007 657
Data fusion 237
Daten, gefilterte 246
–, Original- 246
–, prädizierte 246
Datenassoziation 240
Datenfilterung 242
Datenfusion 237
Datenhierarchie 605
Datenträger 607
Dauerbremsen 423, 585
Dauerstrich-Frequenzmodulation 137
Demokratisierung 565
Demonstrationsmode 36
Depolarisation 113
Deskriptor 229
Detektion 149, 238, 469
–, umrissbasierte 232
Detektionsfenster 226
Detektionsmode 545
Dienste-Server 613
Differenzialsperre, elektronische 426
Differenzialsperrenmanagement 430
Digitale Motor Elektronik (DME) 91
Digitalinstrumente 331
Disc Thickness Variation (DTV) 276
Display 332
–, aktives 338
–, passives 340
Distance to Line Crossing (DLC) 548
Distanzmessung 175
Distronic Plus 480
diversitär 304
Dolly 436
Doppler-Effekt 127, 178
DRBFM-Methode (Design Review Based on Failure Mode) 95
Drehbewegung 98
Drehmagnetquotientenmesswerk 337
Drehmoment 104
Drehmomentsensor 294
Drehrate 106
Drehschemelanhänger 423
Drehzahlfühler 99
–, induktiver 428
Drehzahlfühlerkopf 99
Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe 16
Drei-Ebenen-Modell 15
Drei-Ebenen-Sicherheitskonzept 307
Driftüberwachung 107
Driver Steering Recommendation (DSR) 401
Druckbereich, nominal 109
Drucksensierung 106
Drucksensor 108
Drucksteuerventile 428
Dualsensor 122
Dunkelstromrauschen 202
Dunkelstunden 449
DuoServo-Bremse 281
DuoServo-Feststellbremse 280 ff.
Dynamische Stabilitäts Control (DSC) 91
Dynamisierung 608

E
E/E-Architektur 88
E/E-Systemarchitektur 88
Ebene, fertigkeitsbasierte 7
–, wissensbasierte 7
EBS 285
eCall 616
ECB II 267

ECE-Messschirm 457
ECE-Regelung 29, 457, 459, 475
Effekt, piezoelektrischer 110
EG-Kontrollgeräte 582
EG-Typgenehmigung 29
Einbauanforderungen 95
Einbiege-/Kreuzenassistenz 575
Einbiegen/Kreuzen 25
Eingabemodalität 316
Eingewöhnungszeit 446
Einknicken 431
Einlassventil (stromlos offen, SO-Ventil) 257
Einparkassistenz 471 ff.
Einparkassistenzsystem 110
Einparken, semiautomatisches 471, 475
–, vollautomatisches 471
Einscherer 590
Einspurfahrzeuge 404
Einspurmodell 357, 359, 374 ff., 380, 382, 431
Einzelbildmerkmal 205
Einzelradbremsung 597
Einzelradlenkung 312
Electronic Brake-force Distribution (EBD) 430
Electronic Stability Control (ESC) 275, 285, 395 f.
Electronic Toll Collection (ETC) 618
Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) 88, 151
Elektronische Bremskraftverteilung (EBD) 430
Elektronisches Steuergerät (ECU) 89, 427
ELO-Skala 670
Emergency Call 616
Empfangszweig 175
Empfindlichkeit 102
Empfindlichkeitsfehler 106
Encoder 99
Entfernungsmessung 119
Entkopplung des Fahrers 260
Entscheidungs- und Denkprozesse 12
Entwicklungsprozess 44, 46, 622
Entwicklungswerkzeug 44 f.
EPB-Taster 275
Epipol 209
Epipolarbedingung 209, 211
Erfahrungshorizont 21
Erfassungsbereich 564
Ergonomiestudie 637, 639
Erkennbarkeitsentfernung 453
Erkennen 452
Erlernbarkeit 319
Erwartungskonformität 318
Erweiterbarkeit 239
eSafety-Initiative 26, 666
ESP 356, 359 ff., 588
ESP-Teilsollwinkel 306
ESP-Vorladung 252
Eurokombi 436
European New Car Assessment Programme (Euro NCAP) 28
EVA 599
event-triggered 277
EVITA 69, 352

F
Fahraufgabe (FA) 325
Fahrbahnmarkierung 545, 556
Fahrdynamik 528
Fahrdynamikregelung 395 f., 417, 430
Fahrdynamiksensor 434
Fahrdynamiksystem 401
–, Vernetzung 402
Fahrempfehlung 606
Fahren, autonomes 551, 657 ff.
Fahrerabsichtserkennung 550
Fahreraktivität 551
Fahrerassistenzsystem 43, 545
–, Entwicklung 76
–, Test- und Simulationsumgebung 76
Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung 43
Fahrerfahrung 10
Fahrerlenkempfehlung 401
Fahrerlenkwunsch 309
Fahrer-Reaktionszeit 14
Fahrertotzeit 18
Fahrertyp 10
Fahrerübernahmeaufforderung 590
Fahrerverhalten/-zustand 183
Fahrerwarnelement 343 ff.
Fahrgeschwindigkeit 457
Fahrroboter 667, 669, 671
Fahrschlauch 473, 498
Fahrsicherheit, aktive 443
Fahrsimulator 40
Fahrsituation, kritische 420
Fahrstabilität 404, 445
Fahrstil 10
Fahrstreifen, Warnung vor Verlassen 347
Fahrstreifenbreite 545
Fahrstreifenerkennung 214, 661
Fahrstreifenerkennungssystem 543 ff.
Fahrstreifenkrümmung 545
Fahrstreifenmarkierung 554
Fahrstreifenverlauf 545
Fahrstreifenwechsel 555
Fahrstreifenwechselassistenz 347, 562 ff.
Fahrstreifenzuordnung 179
Fahrtenschreiber 582
Fahrverhaltenskollektiv 21
Fahrversuche 642
Fahrzeug, autonomes 671

Fahrzeugbedienung 12
Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation 665
fahrzeugfest 301
Fahrzeugfreiheitsgrad 431
Fahrzeugführung, Teilaufgaben 11
Fahrzeugführungsaufgabe, Anforderungen 11
Fahrzeugreferenzgeschwindigkeit 425
Fahrzeugsicherheit 28
Fahrzeugstabilisierung 299
Fail-Operational-Modus 310
Fail-Silent-Modus 310
Falschalarm-Rate 59
Farbimager 548
Farbtemperatur 455
Fehlauslösung 49
Fehlerrobustheit 319
Fehlverhalten 24
Ferninfrarotsystem 467
Fernlicht 454, 457, 463
–, blendungsfreies 463
Ferroelektrizität 110
Feststellbremse, elektrische 278
Field of View (FoV) 121
Field Programmable Gate Arrays (FPGA) 233
FIR-Bild 469
Fixed Pattern-Rauschen 202
Flattern 406
FlexRay 91, 277, 284
–, zeitgetriggerter 277
Flexspline 304
Flüssigkristallanzeige
(Liquid Crystal Display, LCD) 340
Fluss, optischer 207
FMSK 134
Folgeregelung 475, 502
Follow-to-Stop 480
Force-Feedback-Pedal 523
Formcodierung 329
Fremdkraftbremsanlage 629
Fremdkraftbremsen 422
Fremdkraftbremssystem 265
Frequency Modulated Continuous Wave
(FMCW) 137
Frequency-Shift-Keying (FSK) 132
Frequenzmodulation 131
Frequenzspektrum 181
Frequenzumtastung 132
Frontalkollision, Warnung 346
Frontalkollisionsgegenmaßnahmen 72, 350, 535
Frontalkollisionsschutzsystem 522 ff.
Frontalunfallschutz 523
Frontscheibendisplay 469
Frontscheinwerfer 455, 459
Führung 16
Funktionsdefinition 47
Funktionsintegration 84
Fusion 237
–, parallele 246
–, sequenzielle 246
– auf Entscheidungsebene 245
– auf Merkmalsebene 245
– auf Rohdatenebene 244
Fusionsarchitektur 245
Fußgänger 451
Fuzzy-Folgeregler 506

G
Gedächtnis 7
Gefahrensituation, Fahrerverhaltens 351
Generator-Bremse 268
Generatorbremsmoment 269
Georeferenzierung 610
Gesamtsystem 320
Geschlecht 8
Geschwindigkeitsermittlung 178, 183
Geschwindigkeitsmessung 126
Geschwindigkeitsregelung, adaptive 279
Gestaltungsleitsätze 317
Gestaltungsprinzipien 319
Gestaltungsprozess, benutzerorientierter 321
Getriebesteuerung 514
Gewöhnungseffekt 446
GIDAS 33
GIDAS-Daten 60
Giereigenfrequenz 444
Gierinstabilität 420
Giermomentkompensation 399
Giermomentregler 399
Gierratenregler 431
Gierwinkel 545
Gleichteilekonzept 96
Gleitgeschwindigkeit 398
Gliederzug 436, 585
Global Chassis Control (GCC) 267, 271, 401, 627
GMR-Effekt (Giant Magneto Resistive) 101
GPS 602
Graphikbildschirm 333
Greifraum 327
Grenzspaltgeschwindigkeit 428
Grob-nach-Fein-Verfahren 234

H
Haar-ähnliches Merkmal 226
Haar-Merkmal 225
Halogenglühlampe 455 f., 460, 462
Halogenscheinwerfer 456
Haltestellenbremse (Door-Brake) 430
Handlungsfehler 25
Hardware-Architektur 658
Harris-Eckendetektor 206

Häufigkeit, kumulierte 352
Hauptachsen 98
Hauptbremszylinder 98
Heading Control (HC) 44
Head-up-Display (HUD) 334, 468
Hell-Dunkel-Kante 457, 461, 463
Hierarchisierung 84
Hilfskraftbremsanlagen 626
Hilfskraftlenkung 438
–, elektrohydraulische (EHPS) 289
–, elektromechanische (EPS) 290
–, hydraulische (HPS) 287
Hinderniss 451
Histogramm über Gradientenorientierung (HOG) 226
H-Mode 647, 653
Hochdruckversorgung 262
Hochleistungsbordnetz 311
Hodometrie 475
Hohlwelle 304
Horizontalkräfte 398
Human Error 24
H-V-Punkt 457
Hybrid-Antrieb 268
Hybrid-Bremssystem 278
hygroskopisch 254
Hypothesenauswahl 241
Hypothesenevaluierung 241
Hypothesengenerierung 216, 241
Hypothesenverifikation 216, 218
Hysterese 103, 112

I
Icon, auditives 523
Implicit Shape Model (ISM) 229
Impulsrad 99
Inferenz 219
Information, auditive 6
–, haptische 6, 311
–, visuelle 5
Informationsabgabe 8
Informationsaufnahme 5, 468
Informationsfluss 660
Informationsgehalt 348
Informationsquellen 12
Informationsrate 345
Informationsstrategie 563
Informationsverarbeitung 6
–, menschliche 343
Informationsverarbeitungsprozess, menschlicher 4
Infrarotbereich 188
Infrarotsensor 547
Infrarotstrahlung 454
Infrastrukturmaßnahme 574
Initialisierungsphase 307
Innovation 180
Innovationsschritt 213 f.
Instrumententafel 331
Integralbremsanlagen 412
Intelligenz 9
Interaktion 314
Interferometrie 189
International Standardisation Organisation (ISO) 40
Interpretation 84
IR-Beleuchtung 187
Isolationswiderstandsmessung 101
ISO-Norm 17387 563
ISO-Norm 26262 670

J
JAMA 40
Joy of Use 320

K
Kabelbaum 88
Kalibriermatrix, extrinsische 201
–, intrinsische 201
Kalmann-Filter 179 f., 214, 545
Kamera 545, 556, 566
–, kalibrierte 200
Kameraeinheit 557
Kammscher Reibungskreis 398
Kanal, auditiver 330
–, haptischer 335, 330
–, kinästhetischer 330
–, visueller 330
Karosserie- oder Achseneigenschaften 96
Karte, lernende 612
Kartendarstellung 607
Kartendaten 611
Kinetose 57
Kippstabilisierung 433, 435
Klassifikation 242
Klassifizierung 238, 469
Klassifizierungsansatz 315
KLT-Tracker 207
Kognition 669
Kollisionsminderung 69
Kollisionsvermeidung 69
Kollisionswarnung, Zeitpunkt 350
Koma 203
Kombibremssattel 280 f.
Kombiinstrument 331
Kombinationsbedienelement 327
Kommunikationsbereich 331
Kommunikationslösung 580
Kompatibilität 319, 325
Kompensation der Entlastung 37
Kompensationsregelung 475

Komplementarität 238
Komplexität 44, 50, 84
Komponentenanforderung 424
Konsistenz 319
Kontinuitätsgleichung des optischen Flusses 207
Kontrast 337, 452, 454 f.
KONVOI 597
Koppelfaktor 112
Koppel-Ortung 602
Korrelationskoeffizient 207
Korrespondenzmerkmal 206
Korridor 608
Kosten 238
Kosten/Nutzen-Relation 629
Kraftfahrzeuginstrumentierung 331
Kraftschlussgrenze 22
Kraftstoffverbrauch 664 f.
Kreiselwirkung 405
Kreuzungsassistenz 572 ff.
kritischer Pfad 307
Krümmung 497
Kugelumlauflenkung 422, 438
Kundenakzeptanz 563
Kursprädiktion 498
Kursregelung 444
Kurvenbremsung 417
Kurvenlicht 457, 459
Kurvenradius 564
Kurvenregelung 506
Kurzschlusserkennung 108

L

Lageregelung 306
Lagertemperatur 100
Lambert-Reflektor 177
Landstraßenlicht 457
Lane Change Decision Aid System 563
Lane Departure Prevention (LDP) 551, 548
Lane Departure Warning (LDW) 43, 548 ff., 592
Lane Keeping Support (LKS) 44, 548, 550, 554
Längsdynamikmanagement (LDM) 483
Längsregelung 510
Laserdioden 194
Laserprojektion 342
Laserschutz 181
Laufzeitmessung 173, 189
LED (Leuchtdiode) 194, 339, 455 ff., 460
LED, organische (OLED) 340
LED-Abblendlicht 461
LED-Scheinwerfer 456
Leistungsfähigkeit 318
–, menschliche 12
Leiterrahmenkonstruktion 422
Lenk- und Ruhezeiten 582
Lenkassistenzfunktion 300
Lenkbefehle 309
Lenkbremse 430
Lenkeingriff 299, 543, 635
–, aktiver 445
–, automatischer 639
Lenkempfindlichkeit 444
Lenkerschlagen 406
Lenkgefühl 301
Lenkgesamtübersetzung 438
Lenkmoment 555, 571
Lenkmomentunterstützung 438
Lenkrad-Arm-System 442
Lenkradhaltung 442
Lenkradmotor 310
Lenkradwinkel 98
Lenkrollradius, negativer 256
Lenksäule 304
Lenkstrategie 446
Lenksystem 558
–, aktives 395 f.
–, elektrisches 440
–, hydraulisches 440
Lenkübersetzung, variable 300
Lenkübertragungsverhalten 444
Lenkung 475
Lenkungsabstimmung 444
Lenkungsparameter 312
Lenkventil 439
Lenkwiderstand 312
Lenkwinkelbedarf 442
Lenkwinkelgeschwindigkeit 102
Lenkwinkelunterstützung 441
Leuchtdichte 452 f., 455
Leuchtweitenregelung, variable 463
Lichtausbeute 455
Lichtsignalanlage 574
Lichtstärke 454
Lichtstrom 455
Lichtverteilung 451, 455 ff., 459 f., 462
–, adaptive 455
LIDAR (Light Detection and Ranging) 172, 462
Lidarsensorik 172
Liefervereinbarung 97
LIN 91
LIN-Bus 88
Linear Frequency Modulation Shift Keying 134
Linksabbiegeassistenz 576
Linsenverzerrung 202
Lochkamera 200
Long-Range-Radar (LRR) 129
Looked-but-Failed-to-See 24
Luftfedersystem, elektronisches (EAS) 628
Luftfederung 422

M
Manöverbreite 635
Map-Matching 601 f.
Mapping 661
Markierungslicht 463
Markt, europäischer 346
Marktakzeptanz 94
Marktdurchdringung 666
Markteinführung 668
Matching 149
Materialdatenblätter 97
Mautsystem 618
Maximum Deskription Length (MDL) 230
Medientrennung 262
Mehrdeutigkeitsauflösung 604
Mehrlenkerachse 312
Mehrstrahlprinzip 185
Mehrzielfähigkeit 146, 173, 496
Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) 314 ff., 465, 476, 558, 563
Merkmaldiagramm 353
Merkmalsextraktion 205, 239
Messwerk 337
Metallfaltenbalgspeicher 262
Methoden, informationsbasierte 217
Migration 239
Mikrocontroller 89
Mikroprozessor 89
Mikrowellensensor 188
Missions- und Manöverplanung 661
Mitigation Braking 537
Mittelkonsole 331
Mobilfunk 614
Mobilitätssteigerung 664
Mode Awareness
Modell, inneres 36
Modularisierung 84
Modularität 239
Modulationslaufzeitmessung 189, 191
Momentanpol 442 f.
Momentensteller 551
Momentenüberlagerung 395
MOST 91
Motion-Stereo 210
Motormoment 416
Motor-Pumpen-Speicher-Aggregat (MPSA) 259
Motorrad-Bremsanlage 410
Motor-Schleppmomentenregelung (MSR) 427
Motorsteuerung 514
Multibeam 182
Multiplexverfahren 185
Munkres-Algorithmus 241
µ-split 426, 445

N
Nachheizphase 97
Nächster-Nachbar-Verfahren 241
Nachtsichtbild 469
Nachtsichtsystem 335, 462, 465, 468, 470
Nachtunfälle 448
Nadelkisseneffekt 203
Nagelbandrattern 549
Nahbereichs-Radarsensor 566
Nahinfrarotsystem 465
Navigation 16, 33, 599 ff.
–, Hybrid- 609
–, Offboard- 609
–, Onboard- 609
Navigation im Fahrzeug 600
NCAP 28
Nebentätigkeit 33
Nichtlinearität 103
Niederdruckspeicher 257
Niedriggeschwindigkeitsbereich 323
NIR-Bild 469
Niveauregulierung 628
Normalfahrbereich 446
Normen 345
Notausweichen 644
Notausweichmanöver 632
Notbremse, automatische 47, 47
Notbremsmanöver 632, 645
Notbremssystem 595
Notbremsung, automatische 639
Notmanöver 524
Notsituation 343
Nullabgleich 104
Nullpunkt Wiederholgenauigkeit 104
Nutzfahrzeuge 582

O
Oberflächenmikromechanik 104
Objekt 452
Objektdetektion 216
Objekt-Diskriminierung 237
Objektivität 55
Objektumfeld 452
Odometrie 475, 571
Ölsäule, hydrostatische 310
Ontologie 219
Operatoren, geometrische 204
–, globale 204
–, lokale 204
–, Punkt- 204
Ortung 601
Ortungsalgorithmus 601
OSEK-Betriebssystem 92

P
Parallelisierung 233 f.
Parkbremse 278
–, elektrische (EPB) 275, 280 ff.
Parklückenvermessung 122
Partikelfilter 213
Pedalbock 251
Pedalcharakteristiksimulator 260
Pedalgefühl 260
Pedalgefühlsimulator 271, 273
Pedalintrusion 266
Pedalkennlinie 261
Pendeleigenform 406
Personenschaden 448
Persönlichkeitsmerkmal 8
Perzentil 21
Perzeption 669
Phasenwechsel 574
Photodetektor 465
Photomischdetektor (Photonic Mixer Device) 187
Photonenrauschen 202
physiologische und kognitive Defizite älterer Fahrer 34
Piezokeramik 112
pin-Diode 175
Pkw-Bremssystem 250
Plancksche Strahlung 467
Planetengetriebe 302
PMD 187, 195 f.
PMD-Empfangseinheit 194
PMD-Kamera 197
PMD-Sensorsystem 192
PND 602
POI 607
Portfolio-Diagramm 349
Posenschätzung 224
Power on Demand 626
Prädiktion 180
Prädiktionsschritt 213 f.
Precision 228
Produktentwicklungsprozess 345
Projektion 199
Projektionsgleichung 200
Projektionsmatrix 201
PRORETA 70, 632 ff.
PROTECTOR 225
Pseudo-Rausch-Modulation 189
Pulsantwort 172
Pulsationsdämpfer 257
Pulslänge 129, 175
Pulsmodulation 129, 189
Push-Dienste 615

Q
Quantisierungsrauschen 202
Querablage 556
Querbeschleunigungen 559
Querempfindlichkeit 106
Querführung 571
Querführungsregelung 645
Querführungssystem 596
Querregelung 558

R
Radaktor 310
RADAR 462
Radarsensor 472
Radarsensorik 123
Radbewegung 98
Raddrehzahlsensor 428
Radschlupfregelung 424
Radstandsverkürzung, virtuelle 443
RDS-TMC 599
Reaktion 638
Reaktionszeit 64, 351, 579
Recall 228
Rechnerkoordinaten 200
Redundanz 238
Referenzgierrate 431
Reflexionseigenschaft 177
Regelung 663
–, kompensatorische (closed loop control) 17
Regelventil, analogisiertes 263
Reibwertsprung 420
Reiz 344
Rektifikation 209
rekuperativ 268
Relativbeschleunigung 179
Relativgeschwindigkeit 145, 492, 564
Relativgeschwindigkeitsermittlung 176
Reliabilität 56
repräsentativ 56
RESPONSE 38
Restbremsmomente 276
Restgröße 18
Restlichtverstärker 465
Retarder 423, 585
Richtcharakteristik 117
Richtlinien 345
Risikoanalyse 48
Risikohomöostas (Risk Homeostasis Theory) 26
Risikokompensation 26
Risikowahrnehmung 7
Road-Train 436
Rollwinkel 404
Rotlichtmissachtung 574
Routensuche 605
Ruckverhinderer 279
Rückfahrkamera 471, 473
Rückfallebene 260

–, hydraulische 266
Rückrollverhinderung 271

S
SAD-Abstandsmaß 207
SAE 40
Safe Truck 591, 595, 597
SANTOS 37
Satellitenortung 602
Sattelauflieger 423
SBI-Verfahren 193
Scannen 185
Scheinwerfer 453
Schlechtwetterlicht 457, 459
Schlupf 356 ff., 362, 366, 378, 386
Schlupfregelung 390
Schlupfregler 371
Schlupfzielwert 372
Schneckengetriebe, selbsthemmendes 301
Schnittfrequenzmodell 19
Schnittstelle, elektrische 95
Schräglage 404
Schrittmotor 337
Schwerpunkthöhe 585
Schwimmgeschwindigkeit 418
Sehen 452
–, mesopisches 452
Sehschärfe 452
Seitenwindanregung 445
Selbsterklärungsfähigkeit 318
Sendezweig 175
Sensor 603
–, synchronisierter 245
–, unsynchronisierter 246
Sensor&Control Unit (SCU) 482
Sensorcluster 104
Sensordatenfusion 86, 91, 237, 634, 642
Sensoreinbauort 96
Sensorfusion 84, 92
Sensorik 580
Sensormodell 81
Sensortechniken 237
Sensortechnologie 86
Sensotronic Brake Control (SBC) 267
Serial Peripheral Interface (SPI) 104
Shape Context 226
Shapelets 226
Short-Range-Radar (SRR) 129
Sicherheitsfunktion 303
Sicherheitskonzept 516
Sicherheitsnachweis 669
Sicherheitsnorm 96
Sichtbarkeitsweite 451, 454 ff., 459 ff., 463
Sichtbedingung 449
Sichtfeld, peripheres 469
Sichtraum 327
Sichtverbesserung 455, 470
Sichtweitenmessung 182
Side Assist (VW) 568
Side-View-Assist (SVA) 122
SIFT 208
Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) 196
Signalformung 148
Signalfrequenz 101
Signalplausibilisierung 307
Signalverarbeitung 148, 239
Simulation 95
Simulator 36
Singlebeam 182
Single-Line-Tracker 546
Sinnes- und Wahrnehmungsprozess 12
Sinneskanal 5, 344
–, visueller 328
Sinnesorgan 344
Situation Awareness 647
Situationsanalyse 243, 465
Situationsbewertung 578
Sitzvibration 352
Sliding-Window 224
Sobeloperator 205
Soft-Stop 279
Software-Architektur 659
Softwarestruktur, modulare 264
Speicherladestrategie 265
Speichermedium 608
Spektralanalyse 148
Sperre, elektromagnetische 302
Spiralkabel 308
Spracherkennung/-steuerung 329
Spurhalteassistenz 543, 545, 554
Spurrillen 546
Spurstabilisierung 431
Spurverlassenswarner 592
Spurwechsel 550
Spurwechselassistenz 545, 597
Stabilisierung 16
Stabilitätsregelung, elektronische 395 f.
Stadtlicht 457
Standardisierung 84
State of Charge (SoC) 276
State of Function (SoF) 276
State of Health (SoH) 276
Stecker, magnetischer 257
Steer-by-Wire 309, 395, 441
Stellglied 558
Stereokamera 208, 469
Stereoskopie 208
Steuerbarkeit 318
Steuergerät (ECU) 302
Steuergerät 86, 88 f.

Steuerung, antizipatorische (open loop control) 17
Stichprobe, abhängige 56
–, unabhängige 56
Stillstandsmanagement 279 f., 285
STOP-Schild-Assistenz 573
Störanregung 445
Strahlungskeule 188
Strahlungsleistung 175
Strahlungswärme 97
Straßenbeleuchtung 451
Straßenverkehr 454
Straßenverkehrsordnung 29
Streulicht 452
Streuung, interindividuelle 57
–, intraindividuelle 57
Strukturtensor 206
Support-Vektor-Maschine (SVM) 224
SURF 208
Sweepen 185
Symbolsystematik 329
System, visuelles 452
Systemanforderung 95
Systemarchitektur 51, 84 ff., 88, 92
Systemfunktionalität, Degradierung 307
Systemmodell Fahrer-Fahrzeug-Umgebung 4
Systemstruktur, redundante 310
Systemvernetzung 90
Systemzustand 558
Systemzustandsdiagramm 564

T
Tag/Nacht-Erkennung 182
Tandem-Bremskraftverstärker 251
Tandem-Hauptzylinder (THz) 253
TC22/SC13/WG8 40
Teileingriff 579
Teilintegralbremsanlage 412
Telematik 599 ff., 612
Telematikanwendung 615
Telematikdienste 616
Temperaturausstrahlung 467
Test 52
Testen 51
Testmethode 44
Time of Flight (ToF) 187
– Messung 172
– Verfahren 194
Time to Collision (TTC) 62, 72 ff., 528
Time to Line Crossing (TLC) 548
Time to Stop 528
Time-Threshold-Evasion 528
time-triggered 277
TMC-Format 608
TOF-Kamera 192
Tonneneffekt 203
Topologie 86
Totalreflexion 178
Toter Winkel 586
Toter Winkel Detektor (Peugeot) 566
Totwinkel-Assistent (Mercedes-Benz) 566
Touchscreen 328
Tracking 148, 150, 179, 194 f., 237
Trackingmode 545
Track-Schätzung 237
Trajektorienplanung 474
Transmissioneigenschaft 177
Transmissionsgrad 177
Transportleistung 586
Trenn- und Balanceventil 263
Trennkolben 262
Trennkupplung 311
Trennventil 259
Triangulation 189
Trojanisches Pferd 52
TTP 91
Typzulassungsbestimmung 27

U
Überforderung 320
Überholmanöver 550
Überholunterstützung 509
Überlagerungsgetriebe 302
Überlagerungslenkung 96, 299, 441, 551
Überlagerungsmoment 401
Überschlag 414
Übersteuerbarkeit 31
Übersteuern 431
Übersteuerung 31
Übertragungsprotokoll 91
Übertragungsverhalten, querdynamisches 444
Ultraschall 188
Ultraschallsensor 110, 115, 472
Ultraschallwandler 113
Umfelderfassung 187
Umfelderkennung 634
Umgebungserfassung 548
Umgebungstemperatur 101
Umkippen 431
Umlenkpunkt 474
Umweltanforderungen 95
Umweltbilanz 664
UN-ECE-Regelungen 27
Unfall 24
Unfallanalyse 25
Unfallart 449
Unfallbeteiligte 449
Unfalldatenanalyse 24
Unfallforschung 451, 562
Unfallgeschehen 572
Unfallrisiko 452, 669

Unfallstatistik 562
Unfalltyp 449
Unfallvermeidung 641
Unfallvermeidungspotenzial 25
Unterbrechbarkeit des Dialogs 34
Unterforderung 320
Unterschiedsempfindlichkeit 453
Untersteuern 431
Unterstützung, haptische 556
Unterstützungsgrad 641

V
Vakuum-Booster 251
Vakuumfluoreszenzanzeige (VFD) 340
Vakuumpumpe 251
Validität 56
Value Added Functions 430
Variantenvielfalt 422
Vehicle in the Loop 52, 69, 76, 79, 81
Verbraucherschutztest 28
Verdeckung; teilweise 224
Verfahren, bewegungsbasierte 217
–, erscheinungsbasiertes 218
–, infrarotkamerabasiertes 223
–, merkmalsbasiertes 207
–, ortsdiskretes 207
–, stereobasiertes 217
–, videobildbasierte 223
Verhalten, fertigkeitsbasiertes (skill-based behaviour) 16
–, regelbasiertes (rule-based behaviour) 7, 16
–, wissensbasiertes (knowledge-based behaviour) 16
Verhaltensadaptation (behavioural adaptation) 25
Verhaltensanpassung (behavioural adaptation) 24
Verkehrskompetenz 21
Verkehrsleitsystem 618
Verkehrsregelung 573
Verkehrssicherheit 24 ff.
Verkehrssimulation 80
Verkehrstelematik 666
Verkehrsunfall 448, 543
Verkehrszeichenerkennung 86, 547
Vernetzung 88, 401, 626
Vernetzungstechnologien 91
Verschmutzungserkennung 182
Verstärker, hydraulischer 252
Verstärkungsfaktor 18
Vertikalkraft 421
Verträglichkeitsmatrix 350
Verzeichnung 203
Verzeihlichkeit 348
Vibration 549
VICS 618
V-Modell 45
Vorausschaulänge (preview distance) 17
Vorderradblockade 408

W
Wahrnehmen 239, 452
Wahrnehmung 5
–, vestibuläre 6
Wahrnehmungsform 317
Wahrnehmungsschwelle 12
Wahrnehmungsverzugszeit 345
Warn- und Eingriffsstrategien 578
Warnbereitschaftsanzeige 550
Warndilemma 579
Warnelemente 345
Warnton 549
Warnung 543, 579
–, akustische 549
–, haptische 549
–, visuelle 549
Weber-Fechnersches Gesetz 199
Weckfunktion 261
Wellen-Generator 304
Wellgetriebe 301
Wertschöpfungskette 619
Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr (Vienna Convention on Road Traffic) 30, 33, 668
Winkelbereich 102
Winkelmessung 140
Winkelüberlagerung 395
Wirksamkeit 351
Witterungsbedingung 449, 570
Wörterbuch, visuelles 229
Wunschabstand 590

X
Xenonentladungslampe 455 f.
Xenonlampe 459 ff.
Xenonscheinwerfer 456

Z
Zahnstangen-Hydrolenkung 302
Zahnstangenlenkung 438
Zentralachsanhänger 423
Zentrum, optisches 200
Zero-drag 276
Zielauswahl 179, 500
Zieleingabe 604
Zielführung 606
Zonenabdeckung 564
Zuordnungshypothese 241
Zuordnungsmatrize 241
Zuordnungsverfahren 241
Zusatzrollwinkel 407
Zustandsautomat 662

Zustandsbeobachter 179
Zustandsraum 212
Zustandsraummodell 180
Zweispurmodell 377

WWW.VIEWEGTEUBNER.DE

Strategisch geplante Technologieentwicklung für den Automarkt

Henning Wallentowitz | Arndt Freialdenhoven | Ingo Olschewski

Strategien in der Automobilindustrie

Technologietrends und Marktentwicklungen

2009. X, 234 S. mit 227 Abb. (ATZ-MTZ Fachbuch) Br. EUR 24,90
ISBN 978-3-8348-0725-0

Nach einer Darstellung der Grundlagen der Automobilindustrie werden die aktuellen Herausforderungen und Treiber für Veränderungen dieser Branche vorgestellt. Das resultierende neue Rollenverständnis zwischen Fahrzeughersteller und Automobilzulieferer wird mit entsprechenden Strategien verdeutlicht. Verschiedene Kooperationsformen und Standortstrategien sowie ein entsprechendes Markenmanagement runden den Themenblock ab. Auf Basis von relevanten Technologieanalysemethoden wird ein detaillierter Überblick über verschiedene Technologietrends in den Feldern Karosserie, Antrieb, Fahrwerk und Elektronik gegeben.

Einfach bestellen: buch@viewegteubner.de
Telefax +49(0)611. 7878-420

TECHNIK BEWEGT.

VIEWEG+ TEUBNER

Änderungen vorbehalten. Erhältlich im Buchhandel oder beim Verlag, zuzügl. Versandkosten